

NIRS-M-215
ISBN 978-4-938987-54-1

平成 20 年 度

放射線医学総合研究所 技術報告書
(研究基盤技術)

NIRS Technology
Volume 2, September 2008



独立行政法人 放射線医学総合研究所

始めに

放射線医学総合研究所 技術報告書 第2巻ができました。この聞き慣れない名前の報告書は、単なる業務報告書ではありません。研究の基盤及びそれに関する技術(以下、研究基盤技術)に携わる人達の日常の技術的活動を技術レポートとしてまとめた報文集です。

今回は、研究基盤技術部だけでなく所内の研究の基盤を支える人達にも声をかけ、参加してもらいました。彼等は、施設・設備の維持・管理だけでなく多様なニーズに応えられるよう技術(力)を、日常の活動として、研鑽し、技術開発も進める、大事な業務をこなしています。従来業務報告書では、これらの活動をきちんと整理し記録することは、十分にできませんでした。創刊の目的である、(1)これらの成果をまとめ次世代へ正しく伝えること、(2)論文作成時等に有用な技術的資料を提供すること、(3)引用文献として応え得る技術報告書に、また一步近づけたなと思っています。

2006年4月から始まった第2期中期計画では、Ⅱ.国民に対して提供するサービスその他の業務の質の向上に関する目標を達成するために取るべき措置として、[3]基盤技術の研究(共同研究)、Ⅲ.業務運営の効率化に関する目標を達成するために取るべき措置として、8.技術基盤の整備・発展が策定されています。また、同時に組織改正が行われ、研究所の基盤となる技術の維持・提供・開発に関することを専らの業務とする研究基盤技術部も発足しました。しかし、これらの定義や具体的事業内容となると、例えば、「共実」と「共用」の違いを混同して使われる場合が多く見受けられるように、研究基盤技術に対する概念が人によって異なり、共通認識として正しく理解されているとは云い難い面があります。

そこで、私たちは、研究の基盤となる技術はこういうものであると例示し、研究基盤及びそれに関する技術に対する議論の材料にも利用してもらおうと、先に挙げた目的に適うと思われる課題を取り上げ、技術報告書として上梓しました。基盤技術の活動全てを網羅することはできませんが、本報告書が、回を重ね、貴重な技術資料として集積されていくことで、研究所の皆様に役立つ技術報告書に育つよう今後も努力していきたいと考えています。

平成20年7月20日

基盤技術センター
研究基盤技術部長
今関 等 記

Contents

- P1 舘野 真太郎*、大久保 喬司、上野 渉、西川 哲
平成19年度の低線量影響実験棟 施設管理の活動状況、及び稼働状況
- P6 舘野 真太郎、飯名瑞希、上野 渉、石田 有香、西川 哲
実験動物研究棟の施設管理の活動状況、及び稼働状況
- P11 保田 隆子*、吉本 正美、前田 圭子、石川 裕二、吉田 聡
透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた組織形態学手法の有用性について
- P16 酢屋 徳啓*、平岡 武、三井 大輔、濱野 毅、前田 武、石川 剛弘
296GBq¹³⁷Cs 線源によるガンマ線照射場の設定
- P22 村松 正幸*、北川 敦志、加藤 裕史、久保 隆史、佐谷 隆司、松井 祐樹、渡辺 剛吉、
吉田 善一
ECR イオン源用金属蒸発源の開発
- P28 上野 渉*
浜松医科大学・医学部附属動物実験施設における技術研修報告
- P38 小西 輝昭*、須田 充、萩原 拓也、酢屋 徳啓、児玉 久美子、前田 武、高野 裕之、
濱野 毅、今関 等
中性子線発生用加速器システム(NASBEE)を用いた *in vitro* 生物研究のための
試料照射方法及び実験環境の整備
- P43 前田 武*、高野 裕之
放射線医学総合研究所のヒューマン・カウンタ
- P52 石田 有香*、小久保 年章、入谷 理一郎、舘野 香里、早尾 辰雄、西川 哲
マウスにおける黄色ブドウ球菌 *Staphylococcus aureus* の同定検査法の改良
- P56 海老澤 悟、北村 尚*、石川 剛弘、今関 等、酢屋 徳啓、高野 裕之、三井 大輔
X線棟標準線源室における線量率の空間分布

- P62 須田 充*、萩原 拓也、酢屋 徳啓、濱野 毅、高田 真志、小西 輝昭、今関 等
速中性子照射用加速器システム (NASBEE)
- P68 三井 大輔*、酢屋 徳啓、石川 剛弘、磯 浩之、今関 等
X線発生装置 TITAN-320 型における線量測定結果
- P75 磯 浩之*、石川 剛弘、樋口 有一、小西 輝昭、及川 将一、酢屋 徳啓、濱野 毅、今関 等
静電加速器棟 (PASTA&SPICE) における利用状況
- P79 石川 剛弘*、磯 浩之、及川 将一、小西 輝昭、北村 尚、樋口 有一
酢屋 徳啓、濱野 毅、今関 等
Micro scanning PIXE における照射量測定システムの開発 その 1
- P85 萩原 拓也*、須田 充、酢屋 徳啓、小西 輝昭、濱野 毅、宮原 信幸、高田 真志、大町 康
平岡 武、今関 等
NASBEE に導入した Be ターゲットの耐久性について (1)
-

平成19年度の低線量影響実験棟 施設管理の活動状況、及び稼働状況

館野 真太郎*¹、大久保 喬司¹、上野 渉²、西川 哲²

1) (株)サイエンス・サービス 2)基盤技術センター研究基盤技術部 実験動物開発・管理課

Received 23 May 2008

要旨

低線量影響実験棟は、ヒトの発達段階に対応した年齢の実験動物を用いて γ 線(137Cs)および中性子線(Be(D,n)B)被ばくによる発がんや寿命への影響を解明することを目的に建設された。これらの実験は、SPFレベル(Specific Pathogen Free: 特定の微生物が存在しない状態)での長期間の動物飼育を必要とするため、厳重な衛生環境コントロールが必要である。平成16年11月よりSPF動物の飼育を開始し、今年度は、P2レベルの動物実験、中性子線の照射実験も開始され本格稼働している。また、稼働時より動物の収容数は毎年増加傾向にあり、本年はマウス、ラットの収容率が70%を越える使用状況である。今回の報告会では実験動物開発・管理課の施設管理の活動状況、及び飼育区域の稼働状況について報告する。

Keywords: 低線量影響実験棟、マウス、ラット、オートクレーブ、P2、ケージ、使用率、稼働状況

***Corresponding Author:**

館野 真太郎 (Shintaro Tateno)

e:mail : s_tateno@nirs.go.jp

はじめに

低線量影響実験棟の動物管理区域は地下1階照射区域、1階洗浄滅菌区域、2階SPFラット飼育区域、3階SPFマウス区域がある。各区域はSPFレベルでの動物飼育施設であることから、原則として動物管理区域内に持ち込む物、使用する物は滅菌、消毒した後、持込使用する。滅菌に高圧蒸気滅菌器、エチレンオキサイドガス滅菌器がある。また、これらの機器の使用を継続するには、年1回の法定点検やメンテナンスを受けなければならない。動物管理区域ではこういった機器の保守、点検と同時に、動物や飼育環境の微生物レベルの衛生状態を確認する必要があり、表1に示した点検、検査を定期的に行っている。

表1 機器メンテナンス、SPF区域内の点検・衛生検査項目

活動内容	期間・頻度	場所
モニター動物搬出	12回/年	マウス区域 ラット区域
落下検査	12回/年	SPF区域内
糞便検査	4回/年	マウス区域 ラット区域
SPF区域内殺菌灯	2回/年	SPF区域内
パスボックス殺菌灯	4回/年	SPF区域内
一方向気流式気流式飼育ラック清掃	2回/年	マウス4号室 ラット4号室
高圧蒸気滅菌器法定点検	1回/年	ケージ洗浄滅菌室
動物用自動給水装置定期メンテナンス。	4回/年	5階機械室

1. SPF区域内への物品の持込について

SPF区域への物品の持ち込みは原則として滅菌、消毒が必要。滅菌に使用する機器には高

圧蒸気滅菌器、ガス滅菌器を使用し滅菌作業を行っている。

①高圧蒸気滅菌器 (図1-1)

ミウラボイラ社製(高圧蒸気滅菌器SF-480W型)で121℃の高圧蒸気で20分以上滅菌を行いSPF区域内へ物品を搬入する。

②エチレンオキサイドガス(E0ガス)滅菌機(図1-1)(ウドノ医機 GCB-6710-D型)で4時間滅菌後、飼育区域内に滅菌物を持ち込む。

機器のメンテナンス、SPF区域内での点検・衛生検査項目



図1-1 左：高圧蒸気滅菌器 右：E0ガス滅菌器

2. SPF区域内への入室に手順、注意点

1. 脱衣室で衣服を脱衣、装飾具を外す。脱衣室内に設置の流しで、手指をブラシを用いて十分に洗浄する。
2. 区域専用滅菌衣類を着用。髪の毛の長い女性等は、クリーンキャップを着用し髪の毛が露出しないことが大切。(基本的に肌の露出面を少なくなるよう着用)
3. 区域専用長靴を着用し入室。
4. 入域後は、薬液マット(次亜鉛素酸ナトリウム500倍希釈液)で長靴を消毒する。
5. 薬液(逆性石鹼200倍希釈液)の入った超音波手洗い器で腕を肘まで浸し、手指を洗浄する。(図2-1)
6. 洗浄後は、グローブを着用、動物との直接的な接触を防ぐ。

図2-1で示したように、滅菌衣類着用後、ドアノブや壁等を触れることで、手洗い後より付着している菌数が増える。超音波手洗い器と薬液に

より、検出できる菌は限りなく少なくなる。

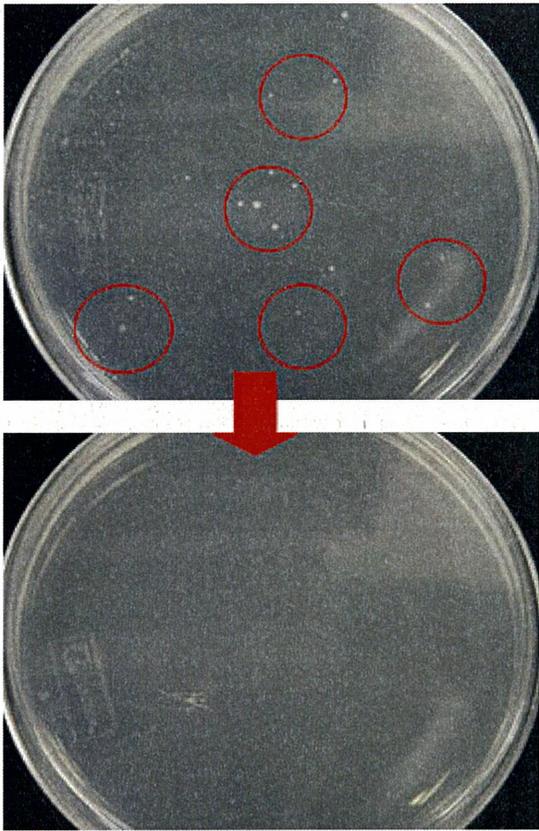


図2-1超音波手洗い前の手指の菌数。培地にはトリプトソイアガー-Difco (236950) を使用して48時間培養した。上図は、滅菌衣類着用後の手指をプレーティングしたシャーレであり、菌を検出した。下図は、超音波手洗い機で洗浄後のプレートであり、菌は検出されていない。

3. P2レベルの動物実験を行うにあたって

本棟S P F区域のマウス4号室、ラット4号室はP2レベル動物実験に対応可能な安全キャビネット、オートクレーブが設置されている。しかし、現在のマウス飼育稼働状況は各室80%以上での稼働状況のためP2実験専用室としての使用は困難であり、P2レベルの動物と一般のマウスを同室で飼育する方法を検討した。本年度は5月、11月と2回P2レベルの実験が行われたが、事前にユーザー会議をとおして利用者との打ち合わせを行うことで、スムーズに運用を行うことが出来た。

4. 低線量棟動物飼育室の稼働状況

4-1 マウス区域の飼育設備

マウス飼育にはアルミ製5匹飼用ケージを使用している図4-1。飼育室は4室あり、1号室～3号室内にはステンレス製一方向気流式飼育ラック垂れ壁方式(精研製)、4号室はステンレス製一方向気流式飼育ラックチャンバー方式が各室10台設置されている(図4-2)。各室何れも560ケージ収容が可能でマウスケージは最大2240ケージの収容が可能。



図4-1 トキワ製 マウス5匹用TM-413B ケージ：アルミニウム 170W×300D×110H
フタ：アルミ打抜きステンレス金網張り



図4-2 3階マウス区域飼育室。左：3号室
右：4号室

4-2 ラット区域の飼育設備

ラット飼育にはアルミ製3匹飼用ケージ使用している図4-4。飼育室は4室あり、1号室～3号室内にはステンレス製一方向気流式飼育ラック垂れ壁方式(精研製)、4号室はステンレス製一方向気流式飼育ラックチャンバー方式が各室10台設置されている(図4-5)。1号室、2号室は270ケージ、3号室216ケージ、4号室270ケージ収容が可

能でラットケージは最大 1026 ケージの収容が可能である。

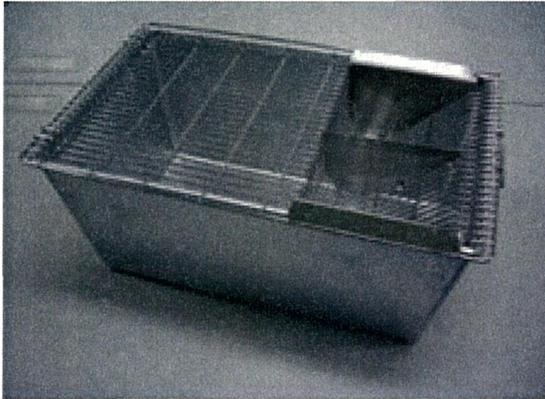


図 4-4 トキワ製 ラット 3 匹用 TR-361 ケージ：アルミニウム 276W×426D×200H フタ：ステンレス 落としこみタイプ。

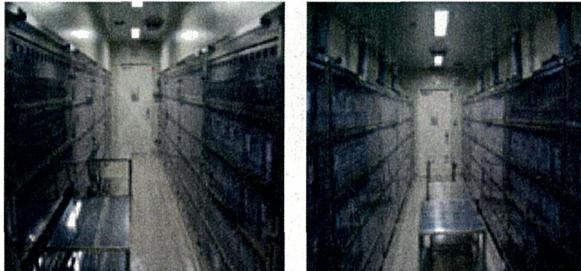


図 4-5 2階ラット区域飼育。左：3号室 右：4号室

5. 飼育区域稼働状況について

5-1 平成 19 年度飼育室別稼働状況

マウス 1 号室、2 号室は、年度始めの稼働状況が 0 になっている、これは 1 号室、2 号室で飼育されていた動物より黄色ブドウ球菌が検出され、1 号室、2 号室の動物を処分し飼育室内のクリーンアップを行ったためである。その後、本年は中性子の照射実験も始まったことから、急激に稼働率が上昇しているのが見られる。ラット区域の稼働状況は、50% を超え安定した稼働状況を保っている。マウス区域の部屋別の稼働状況を（図 5-1）、ラット区域の部屋別の稼働状況を（図 5-2）に示した。

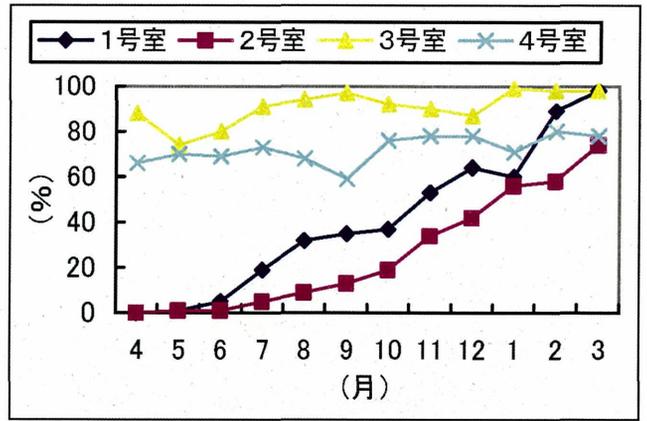


図 5-1 平成 19 年度 マウス室稼働状況

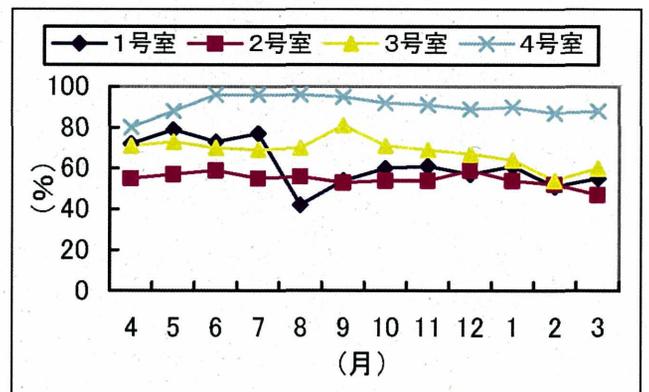


図 5-2 平成 19 年度 ラット室稼働状況

5-2 年度別、動物飼育室稼働状況

平成 16 年度末より低線量影響実験棟が稼働してから、年度別に各区域の稼働状況を調査した。稼働率は年々増え、現在の各区域とも 60% を超える稼働率である。年度別のマウス区域稼働状況(図 5-3)、ラット区域稼働状況(図 5-4)に示した。

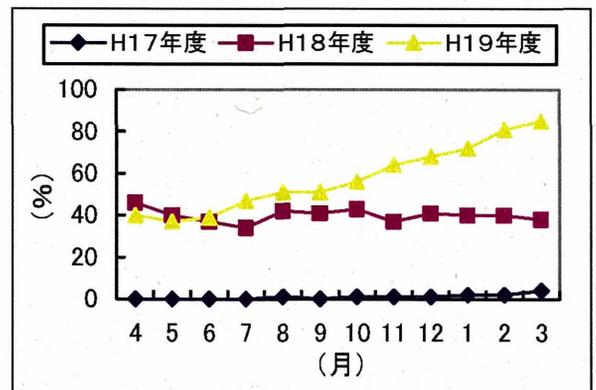


図 5-3 年度別マウス区域稼働状況

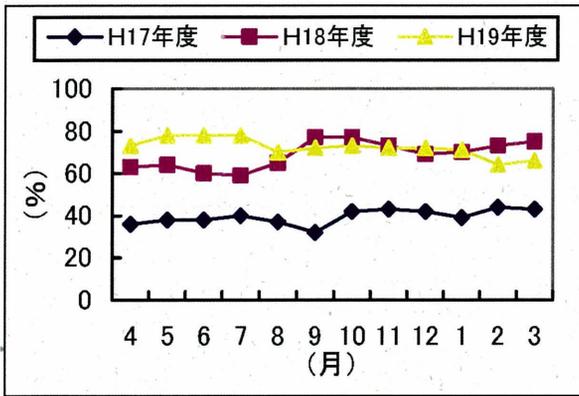


図 5-4 年度別ラット区域稼働状況

まとめ

H19年度のケージ稼働状況は、各飼育区域はとても盛況な使用状況で、使用者側、管理者側も飼育作業に特に労力が必要とされる。飼育ケージ、フタ、給水瓶などの飼育物品は最大での使用状況であるため、使用者側、運用者側の連携が極めて重要である。

引用文献

- [1] トキワ科学器機 (株) カタログ
- [2] 低線量影響実験棟 実験動物取扱作業要領

実験動物研究棟の施設管理の活動状況、及び稼働状況

館野 真太郎*^{1,2}、飯名瑞希^{1,2}、上野 渉²、石田 有香²、西川 哲²

1) (株)サイエンス・サービス

2) 基盤技術センター研究基盤技術部 実験動物開発・管理課

Received 23 May 2008

要旨 実験動物研究棟は、これまでCV(Conventional:持っている微生物が明らかではない)施設として運営されてきたために、散発的な微生物検査は行っていたが定期的な微生物検査は実施されていなかった。本施設の衛生状態の把握は、信頼ある実験結果を得るために必要であり、また、より高い衛生状態での飼育管理を望むユーザーの要望を満たすために、平成19年度7月より3ヶ月に1回(年4回)、モニター動物による定期的な微生物検査を開始した。これまでに、実施した2回の微生物検査の結果はSPFレベル(Specific Pathogen Free:特定の微生物が存在しない状態)と同等の施設であるという検査結果を得た。更に、飼育室間の移動に際し、共用箇所での汚染防止策として、動物管理区域内への入室前に、手指をアルコール消毒した後、立ち入るようシステムを改善した。今回の報告会では当課の施設管理の活動状況、及び飼育区域の稼働状況について紹介する。

Keyword: 実験動物研究棟、マウス、ラット、ケージ、稼働率、稼働状況、微生物、検査結果、モニター

***Corresponding Author:**

館野 真太郎 (Shintaro Tateno)

e.mail: s_tateno@nirs.go.jp

1. はじめに

実験動物研究棟は、近年増加した遺伝子改変小動物を用いた研究に対応するため、P1AおよびP2Aレベルでの飼育設備も兼ね備えたCV (Conventional) 動物飼育区域として運営されている。本棟3階および4階は、マウス、ラットの通常飼育区域に加え、一部区域を検疫室として運用し、微生物汚染の疑わしい動物の検疫期間中の隔離飼育室、ならびにモルモット、ハムスターおよびウサギ等を飼育する汎用動物飼育室を備えている。これらに加え、平成17年10月には実験動物行動解析区域の運用も開始された。しかし、実験動物研究棟は、Conventional 施設ということから、使用者からの依頼による散発的な微生物検査は行っていたが、定期的な微生物検査は行っていなかった。本施設の衛生状態を把握することは、信頼ある実験結果を得るために必要であり、平成19年度7月よりモニター動物を使用しての微生物検査を実施した。こうした動物飼育区域の維持は動物の衛生状態のみならず、飼育施設の飼育環境のコントロールについても信頼あるデータを得るために必要であるので、平成19年度における実験動物開発・管理課の活動状況を報告する。(表1)

2. 本年度より実施した微生物検査

本施設の微生物検査はモニター動物を用いて行った。モニター動物にはマウス(系統=Jcl:ICR 性別=♀6週齢 各室2匹)ラット(系統=Slc:wistar♀6週齢 各室2匹)を使用し、各飼育で3ヶ月間飼育する。同室内の微生物を自然定着させ3ヶ月後、モニター動物を搬出し、微生物検査を行う。マウスは深麻酔下(イソフルラン)、ラットは安楽死(炭酸ガス)させた後採血、血清を採取。血清はELISA法(プレザイム「生研」、デンカ生研)を用い

てSendai virus(HVJ)、Mouse hepatitis virus (MHV)、Tyzzler's organism (*Clostridium piliforme*)、*Mycoplasma pulmonis* を、凝集反応を用いて *Corynebacterium kutscheri*、*Bordetella bronchiseptica*(ラットのみ)を、IFA法(間接蛍光抗体法)を用いてCAR bacillusの検査を行い、それぞれの病原微生物に対する検査を行った。

外部所見で異常の有無を観察後、動物を固定、PPLOブロス(PPLO BROTH w/o CV、DIFCO)で十分に湿らせた滅菌綿棒を用いて鼻腔と口腔の粘液をそれぞれ採取し、マイコプラズマ選択平板培地、コリネ菌選択平板培地へ塗抹、37℃でそれぞれ7日間、48時間培養。頸部を切開して咽喉頭および器官を露出させ、ハサミで作った切り口より綿棒を挿入し、管腔内の粘液を拭き取り5%ウマ血液寒天平板培地へ塗抹した後、同じ綿棒を用いて再度管腔内の粘液を拭き取りマイコプラズマ選択平板培地へ塗抹し、37℃、48時間培養を行った。ラットはさらに粘液を拭き取り、DHL平板培地(パールコア DHL寒天培地「栄研」、栄研化学)へ塗抹、37℃、24時間培養を行った。腹腔ならびに胸腔を切開し、目視による臓器の異常の有無を観察し、盲腸の一部を切除し、盲腸内容物をDHL平板培地、コリネ菌選択平板培地、NAC選択平板培地(NAC寒天培地「栄研」、栄研化学)へ接種後、白金耳で塗抹、37℃でそれぞれ24時間、48時間培養を行った。また、十二指腸も一部切除し、スライドグラス上に内容物を絞り出し鏡顕した(×150)。解剖中、肉眼所見で異常が観察された場合は病理組織学的な検査を行い、病原微生物による感染性の異常ではないことを確認した。表2に微生物検査結果を示した。

表1 器機メンテナンス、衛生検査項目

活動内容	期間・頻度	場所
コンセント増設	7月	3階EVフロア
4階大扉ヒンジ交換	10月	4階洗浄滅菌室入り口
入退管理システム取り付け	2月～3月	玄関、各飼育区域入り口
モニター動物搬出入	4回/年	3階 P1A マウス飼育区域 4階 P2A 動物飼育区域
各飼育室・室圧調整	3～4回/年	3階 P1A マウス飼育区域
飼育装置清掃	6～7回/年	1～4階各飼育区域
空調機給排気	2回/年	1階機械室、屋上機械室
殺菌灯交換	2回/年	動物管理区域全域

表2 平成19年度 微生物検査結果

検査対象 ウイルス		マウス		ラット	
		10月	1月	10月	1月
培養検査	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	0/19	0/18	0/4	0/6
	<i>Salmonella app</i>	0/19	0/18	0/4	0/6
	<i>Pasteurella pneumotropica</i>	0/19	0/18	0/4	0/6
	<i>Bordetella bronchiseptica</i>	0/19	0/18	0/4	0/6
	<i>Citobacter rodentium</i>	0/19	0/18	0/4	0/6
	<i>Corynebacterium kutscheri</i>	0/19	0/18	0/4	0/6
	<i>Mycoplasma spp</i>	0/19	0/18	0/4	0/6
血清検査	<i>Sendai virus</i>	0/19	0/18	0/4	0/6
	<i>Mouse hepatitis virus</i>	0/19	0/18	0/4	0/6
	<i>Tyzzer's organism</i>	0/19	0/18	0/4	0/6
	<i>Mycoplasma pulmonis</i>	0/19	0/18	0/4	0/6
	<i>Corynebacterium kutscheri</i>	0/19	0/18	0/4	0/6
	<i>Bordetella bronchiseptica</i>	0/19	0/18	0/4	0/6
	<i>CAR bacillus</i>	0/9	0/9	0/2	0/3
顕微鏡検査	<i>Spirochete muris</i>	0/19	0/18	0/4	0/6
	<i>Giardia muris</i>	0/19	0/18	0/4	0/6

表3 飼育室別最大ケージ収容数

階	飼育室名	最大ケージ最大 収容可能数
1階	P2A・P1A マウス・ラット隔離飼育室	マウス 80、ラット 60
	隔離マウス飼育室	192
	隔離ラット飼育室	80
	隔離汎用動物飼育室	60
3階	マウス飼育室1	310
	マウス飼育室2	356
	マウス飼育室3	376
	マウス飼育室4	356
	マウス飼育室5	328
	マウス飼育室6	333
	マウス飼育室7	314
	マウス飼育室8	300
4階	P2A マウス飼育室	350
	P2A ラット飼育室	80
	ラット飼育室1	197
	ラット飼育室2	140
	ラット飼育室3	160
	ラット飼育室4	60

3. 動物飼育管理区域へ入室する前の改善点

より高い衛生状態の飼育管理を望むユーザーの要望を満たすことから、飼育区域をより衛生的に使用してもらうため、入室前には汚染防止策として、消毒用アルコールによる手指の消毒、また区域内共用箇所(ドアノブ等)の消毒を実施するよう改善した。消毒用アルコール(アルコール70%希釈液)は、一般細菌、ウイルスに消毒効果が高いことから適当であると判断した。

4. 平成19年度 動物管理区域の稼働状況

実験動物研究棟は Conventional 施設ということもあり、その利用の簡便さから所内動物施設の中でも最も利用が多く、平成19年度では約270人の利用者が登録されている。利用研究グループは15グループもの利用があった。飼育室内の利用では1室を数グループで共同利用するなど、区域全体の飼育室稼働状況も50%を超える利用となっている。各飼育区域の収容数を表3に、稼働状況を図1から図4に示した。

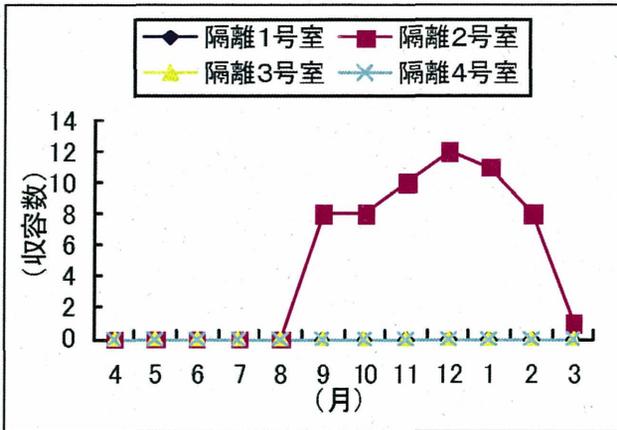


図1. 隔離飼育区域 飼育室別稼働状況

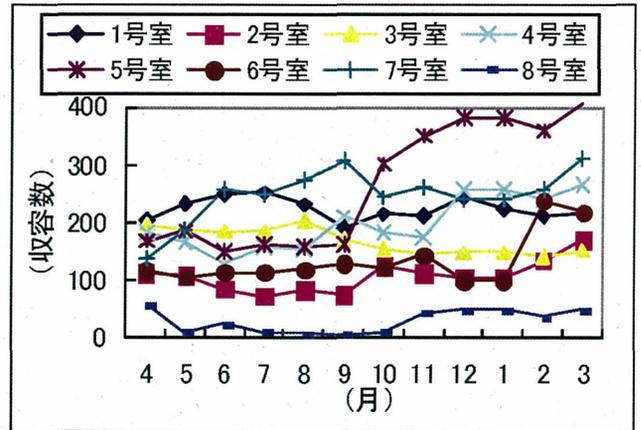


図2. 3階マウス区域 飼育室別稼働状況

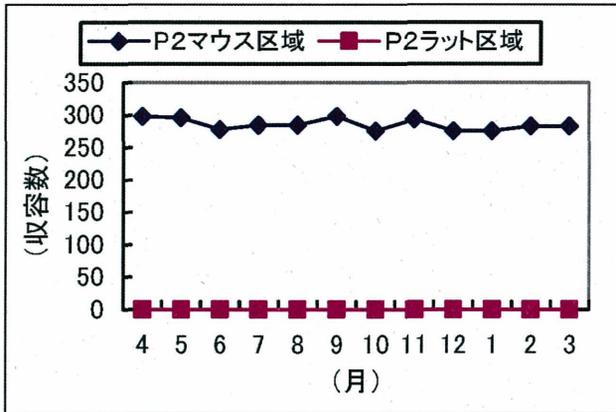


図3. 4階P2区域 区域別稼働状況

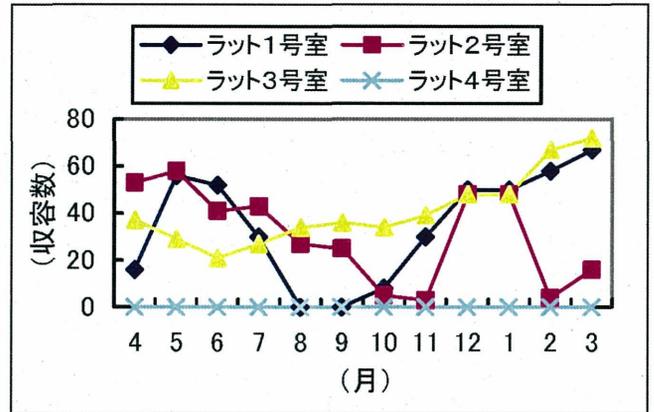


図4. 4階ラット区域 飼育室別稼働状況

5. まとめ

飼育施設の汚染は、①汚染動物、②無滅菌で搬入された機材、③人に付着した微生物等が原因であると報告されている。飼育施設は共用施設であり、多くの人出入りは、施設を汚染するリスクが高くなる。現在、飼育室の衛生状況は良好であり今後もこの衛生状態を維持するためには、使用者の協力が必要不可欠であり、今後とも機材の滅菌、消毒、ならびに念入りな手洗いの実施を徹底するように指導していく。

引用文献

実験動物の技術と応用 実践編 (社団法人日本実験動物協会編)

透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた組織形態学手法の有用性について

保田 隆子*¹、吉本 正美²、前田 圭子¹、石川 裕二³、吉田 聡¹

- 1) 放射線防護センター環境グループ水域チーム
- 2) 日本医科大学
- 3) 放射線防護センター防護技術部

Received 30 May 2008

要旨

我々はメダカ胚をモデル実験動物に用いて発生中の脳で起こる放射線誘発アポトーシスの研究を行っている。メダカは飼育の簡便さ、条件を整えれば実験材料となる卵が毎日採卵可能であること、卵殻が透明であるため発生の全過程を実体顕微鏡下で観察可能であることなど、哺乳類にはない多くの利点を有している。メダカの脳の発生は、基本的に哺乳類と多くの共通点があり本質的に変わらないものであることが石川らの研究から明らかにされており、メダカが脳研究のモデル動物として十分有用であることが示されている。

アポトーシスは、核濃縮、アポトーシス小体の形成、及び食細胞による食食からなる一連の過程であり、これらアポトーシスに特徴的な形態を観察するには透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた観察が非常に有効である。そこで本研究においてもTEMを用いて形態観察を行い、その詳細を明らかにした。本報告では、我々の行った研究の中でTEMを用いて新たに判明したことを明らかにし、TEMの有用性について触れたい。

Keywords: 透過型電子顕微鏡、メダカ胚、発達神経毒性、中脳視蓋、放射線誘発アポトーシス

***Corresponding author:**

保田 隆子 (Takako Yasuda)

e-mail: t_yasuda@nirs.go.jp

1. はじめに

～透過型電子顕微鏡(TEM)とはどのような装置なのか -光学顕微鏡との違いから～

透過型電子顕微鏡は、光より波長の短い電子線を透過させて試料を観察する（そのため”透過型” “電子顕微鏡 Transmission Electron Microscope, TEM という）ことにより光学顕微鏡では不可能な微細な構造を観察することが出来る。電子は直接目で見えないため、蛍光板、あるいは CCD カメラに当てて光や電流に変え画像として観察する。TEM では試料に由来する電子の散乱を利用して構造をコントラストの違いとして観察するが生物試料の場合、C, O, H などの軽元素からなりほとんど電子の散乱能に違いがないため、重金属を付着させ（電子染色）散乱能を大きくして観察する。

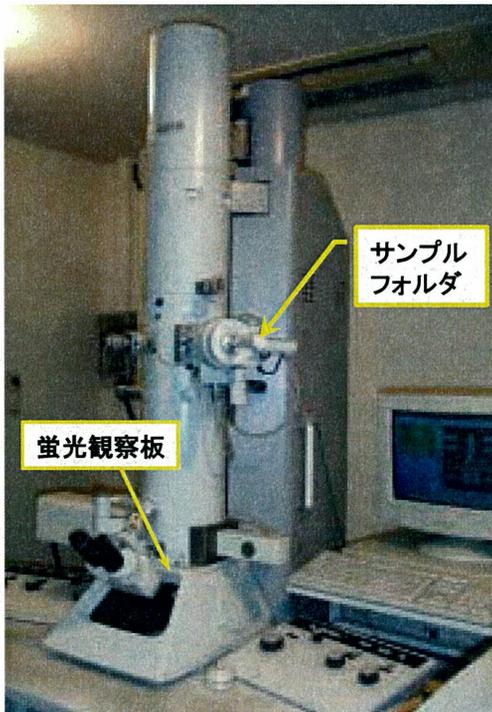


図 a. 日本医大中央電顕室 (HitachiH-7500)

TEM 装置のこれらの特長から試料の作成には以下のことが必要となる。

・試料の厚さ：電子は電荷を持つため物質透過能が低いので、試料が分厚くなると透過する電子が減り散乱電子の増加により像が暗くなるとともにボケが生じるため、超薄切片（60 – 80

nm）を作成しなければならない。

・真空中での安定性：電子顕微鏡の鏡体内部は高真空（ 10^{-3} Pa）になっているため、観察する試料はこの中で安定である必要がある。そのため、試料は完全に脱水しなければならない。電顕の中に水を持ち込むことは“絶対的禁忌”である。

・電子線に対する安定性：しっかりと固定（通常はグルタルアルデヒド (GA) & パラフォルムアルデヒド (PFA) 前固定、オスミウム酸 (OsO₄) 後固定を行う) し、あるがままを安定した状態で観察できるようにしなければならない。

2. 発生中のメダカ胚 (st..28) の脳で起こる放射線誘発アポトーシスの観察

2-1. 実験の背景

メダカ胚は体外で発生しかつ卵殻が透明なので哺乳類の胎児では不可能な発生の全過程を観察することが出来る利点をもっている^[1]。また、メダカの脳発生は基本的に哺乳類のそれと同様であることが私達の研究の結果明らかになっている^[2-5]。放射線のヒト胎児に対する放射線影響は、広島・長崎の疫学データにより、器官形成期が終わった妊娠 8-15 週が最も高感受性であり、高頻度で重度精神遅滞症、小頭症の発生が報告されている^[6]。この時期はマウスでは妊娠 13-13.5 日に相当し、メダカ胚では st.28-30 に相当する^[4]。我々はこの時期の胚に LD50 より低い X 線 1-10Gy を急照射し、中脳視蓋周縁部に放射線誘発細胞死が一過性に観察されることを見出した^[7]。この放射線誘発細胞死の起こる部分は視蓋の増殖部と一致する^[8]。また我々は、この細胞死の様子をアクリジンオレンジ(AO)蛍光染色剤を用いて、胚を生かしたままアポトーシスの発生から貪食までを可視化することに成功した(図 1)。この観察では散在する単一の濃縮核、及び濃縮核が 4 - 12 個花びら状(ロゼッタ状)に局所的に集まったもの(図 2, 3)の 2 種類がみられた。

2-2. 透過型電子顕微鏡を用いた放射線誘発アポトーシスの観察

細胞死の様相を詳細にしらべるため、樹脂切片を作成し光学顕微鏡で観察をした(図3)。その結果、AOで観察した花びら状(ロゼッタ状)の塊(赤丸部分)が細胞核の濃縮した塊であることは明らかになったが、細胞レベルから詳細な観察をするには電子顕微鏡での観察が必

要となった。そこで PFA&GA 前固定したメダカ胚をオスミウム後固定し、エポキシ樹脂包埋後、70 nm 超薄切片を作成しクエン酸鉛で染色後、透過型電子顕微鏡 Hitachi H-7500(日本医大中央電顕室)で観察した。その結果、AO 染色でロゼッタ状の塊となって観察されたのは、アポトーシス細胞が 4-12 個局所的に集団になったものであることが判明した(図4)^[9]。

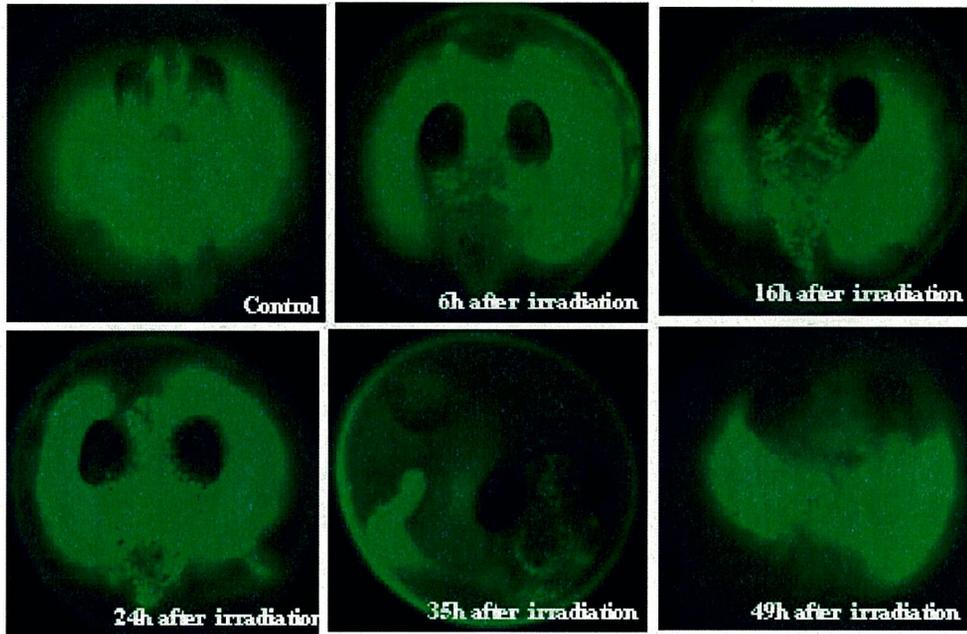


図1. アクリジンオレンジ蛍光染色による放射線誘発アポトーシス全過程の可視化 (control, 照射後 6 h, 16 h, 24 h, 35 h, 49 h に蛍光顕微鏡で観察した様子)

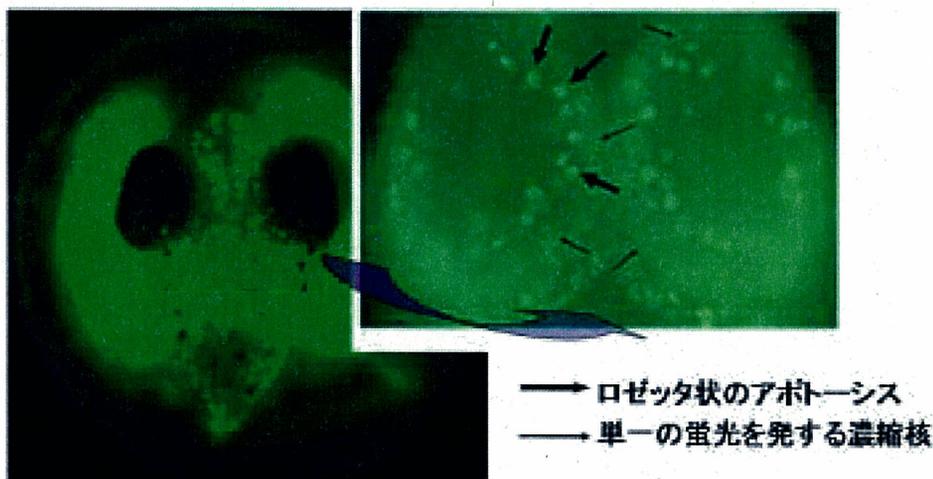


図2. メダカ胚 (st. 28) に X 線 5Gy 照射 24 時間後、アクリジンオレンジ蛍光染色したもの
左: メダカ胚を生きのまま観察した様子 右: メダカ胚の視蓋部、拡大写真

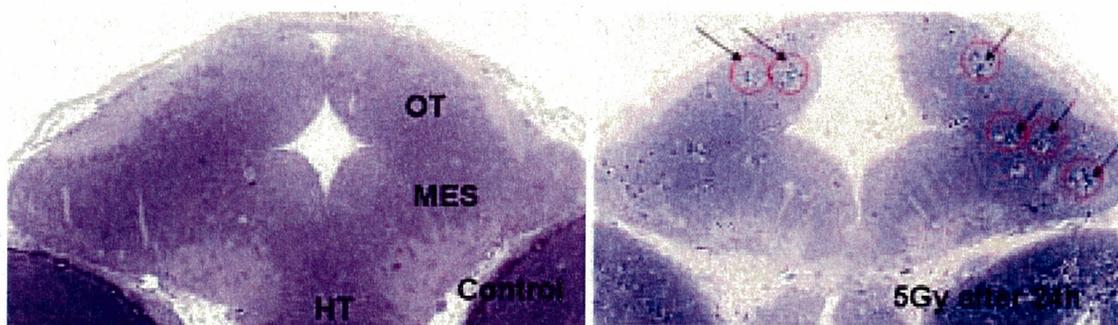


図 3. メダカ胚、中脳(視蓋)で起こる放射線誘発細胞死 (光顕像)
 左: コントロール 右: 放射線 5Gy 照射後に起こる細胞死 (赤丸印)
 OT = optic tectum; TG = mesencephalic tegmentum; V = ventricle

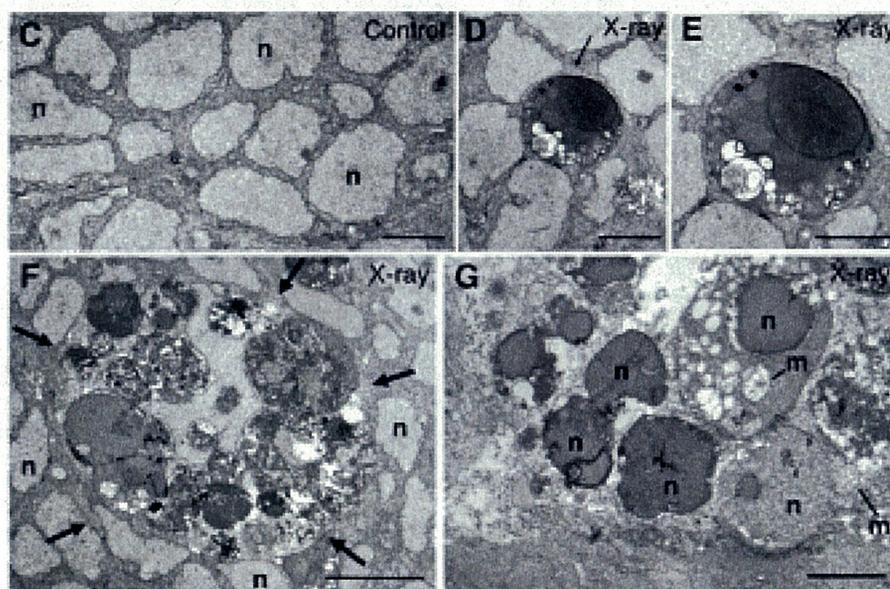


図 4. メダカ胚視蓋部で起こる放射線誘発アポトーシス TEM 観察像。C.正常細胞 D.単一の
 アポトーシス細胞 E. D 拡大像 F.アポトーシス細胞のロゼッタ状の塊 G. 別のロゼッタ状
 の塊拡大像

3. TEM 観察の有用性

TEM 観察により光学顕微鏡で観察された 2 種類の放射線誘発アポトーシス像の詳細を明らかにすることが可能となった。つまり、放射線により核 (DNA) に損傷を受けた細胞はアポトーシスにより貪食除去される前に、細胞分裂を数回繰り返してアポトーシス細胞の塊 (ロゼッタ状の塊) を形成する、つまり増殖死を起こしているという可能性が示唆された。これは、TEM を用いたことにより明らかになったものであり、光学顕微鏡のみの観察では

得られなかった結果である。

組織形態学はヒトの感覚で最も優れた視覚に訴えることができる手段であり、疑いの余地のない明瞭な結果を示すことができる利点がある。透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いた観察は、形態学の可能性をさらに広げ新たな発見を期待できる有力な手段であるといえよう。しかし、TEM は光学顕微鏡と比較して簡便性、汎用性に欠け、また、正確な観察のためには超薄切片作成の高度な技術や装置が必要であるなど一般的に気軽に用いるには問題点も多

い。

最後になりましたが、現在放医研では TEM の装置を使用することは出来ない為他機関の装置を借りる必要がありますが、高額な機器類であるウルトラマイクロトーム、ガラスナイフメーカー等（全てライカ製）、超薄切片作成に必要な機器類は環境グループ（実験動物棟 C206）にて所有しており、また TEM 観察に必要な組織切片作成に関する技術面でも必要であれば協力させて頂くことが可能です。

参考文献

- [1] Y. Ishikawa, *BioEssays.*, 22 (2000)487-495.
- [2] Y. Ishikawa, T. Kage, N. Yamamoto, M. Yoshimoto, T. Yasuda, A. Matsumoto, K. Maruyama, and H. Ito., *J. Comp. Neurol.*, 476(2004) 240-253.
- [3] T. Kage, H. Takeda, T. Yasuda, K. Maruyama, N. Yamamoto, M. Yoshimoto, K. Araki, K. Inohaya, H. Okamoto, S. Yasumasu, K. Watanabe, H. Ito, and Y. Ishikawa, *J. Comp. Neurol.*, 476 (2004) 219-239.
- [4] Y. Ishikawa, N. Yamamoto, M. Yoshimoto, T. Yasuda, K. Maruyama, T. Kage, H. Takeda, and H. Ito, *Brain. Behav. Evol.*, 69(2007) 87-95.
- [5] Y. Ishikawa, T. Yasuda, T. Kage, S. Takashima, M. Yoshimoto, N. Yamamoto, K. Maruyama, H. Takeda, H. Ito, *Zool. Sci.*, 25(2008) 407-418.
- [6] UNSCEAR (1993) Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993 UNSCEAR Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, Radiation effects on the developing human brain. United Nations Publication, New York.
- [7] T. Yasuda, K. Aoki, A. Matsumoto, K. Maruyama, Y. Hyodo-Taguchi, S. Fushiki, Y. Ishikawa, Radiation-induced brain cell death can be observed in living medaka embryos. *J. Radiat. Res.*, 47 (2006) 295-303.
- [8] V. Nguyen, K. Deschet, T. Henrich, E. Godet, J.-S. Joly, J. Wittbrodt, D. Chourrout, and F. Bourrat, *J. Comp.* (1999) 385-404.
- [9] T. Yasuda, M. Yoshimoto, M. Keiko, A. Matsumoto, K. Maruyama, and Y. Ishikawa, *J. Radiat. Res.* (2008) in press.

296GBq¹³⁷Cs 線源によるガンマ線照射場の設定

酢屋 徳啓*、平岡 武、三井 大輔、濱野 毅、前田 武、石川 剛弘、

基盤技術センター 研究基盤技術部 放射線発生装置利用技術開発課

Received 30 May 2008

要旨

第1ガンマ線棟の閉鎖に伴い新ガンマ線棟を平成19年度に、第3研究棟旧NMR室に導入した。このガンマ線照射装置は2線源同時照射が出来る特殊な装置で、10月に296GBq¹³⁷Cs線源が入荷し稼働中である。3月には7.4TBq¹³⁷Csの線源も入荷した。新ガンマ線照射装置は、様々な照射体や実験装置を用いて利用するケースが考えられるため、周りの構造物による吸収・散乱の補正を施して線量を正しく評価する必要がある。その第1段階として296GBq¹³⁷Cs線源の電離箱による線量測定とCdTeスペクトロメーターによるエネルギー測定やガラス線量計などを使った電離箱にはない利点を活用した測定を予備実験として行った。[3]今回は、2方向2線源同時照射式スタンド型ガンマ線照射装置「PSCD2008HS型照射装置」の内、296GBq¹³⁷Cs線源からのガンマ線照射場を設計して、その線質や線量分布を決定した。その予備実験の測定結果と新ガンマ線棟の照射装置の概要について報告する。

Keywords: γ 線照射室、第1 γ 線棟、296GBq¹³⁷Cs、7.4TBq¹³⁷Cs、2線源同時照射、CdTe、エネルギー測定、ガラス線量計、電離箱、減弱フィルター、吸収線量率

***Corresponding Author:**

酢屋 徳啓 (Noriyoshi Suya)

e:mail nsuya@nirs.go.jp

1. 本装置の概要と線源の仕様

γ 線照射室は元 29MeV ベータトロン棟の治療照射室であった。大小2つの部屋は装置の使用目的にあわせた形状になっている。そのため線源を2つの部屋の間置き、両方向に同時照射できる2線源式にした。また、旧第1ガンマ線棟では360°照射が可能で、同時に2ユーザーが使用できたため、新ガンマ線棟では0°と180°2方向同時に2ユーザーで使用出来るような仕様にした。2線源の強度は7.4TBqと296GBqで、ユーザー会議での要望の中で大線量と低線量それぞれ一番大きい線量にあわせた。このような経緯により γ 線照射室は設置された。

1-1. 線源強度減弱フィルタ

各線源について線量率を1/100,1/30,1/10,1/3まで減弱可能である。全てのフィルタは、鉛をステンレス鋼板でカバーした構造で、線源格納容器遮蔽体のコリメータ前面にネジ止め出来るようになっている。各フィルタは専用クレーンで着脱する。

1-2. 照射範囲

上下コリメータ角度は137Cs296GBq側で上下それぞれ10°。137Cs7.4TBq側は上下それぞれ19°。左右コリメータ角度は137Cs296GBq側で右28°、左20°。137Cs7.4TBq側は右20°、左28°である。設置床面から線源中心までの高さは1500mmである。

1-3. 線源容器

容器の形状と線源の移動機構を図1に示す。線源容器は2線源を線源プラグに格納し、線源ローターを90度回転させることにより2線源を同時に2方向に照射できる。また、線源が照射位置から格納位置まで移動する時間は20秒以内になっている。その他、コリメータで決まる半影を含めた照射野外の線量率は照射野内の線量率の1/1000以下であり、線源容器の遮蔽体は線源格納時の容器表面線量率が2.0

$\mu\text{Sv/h}$ 以下になっている。

1-4. 安全装置

表示盤は照射室入り口に設置してある。インターロックとしては、ドアリミットが設置され、照射室入り口ドアは開いていると照射できないようになっている。また、照射状態になった時はドアがロックされ、外から入れないようにになっている。中からは非常停止スイッチでロックが解除されるようになっている。

1-5. 停電時、緊急停止時

コントロールパネルの機構と表示は図2に示す。コントロールパネルはUPSにより、照射中でも線源を格納位置に移動できる。また、その時点での照射時間、照射線量を記録する。装置の異常発生時は光と警報音で異常を知らせる。手動でも緊急停止出来るようになっている。

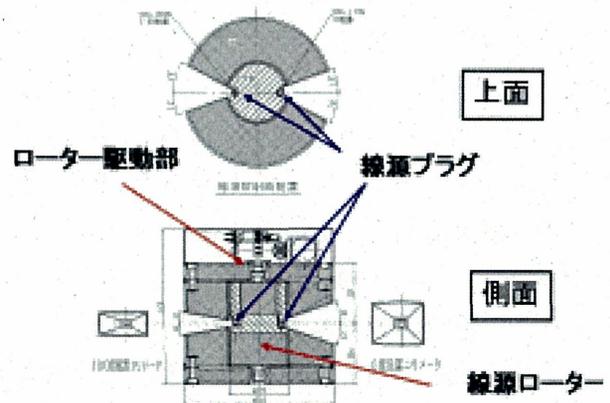


図1.線源容器と線源移動機構

図は照射時の状態。格納時は線源ローターが駆動し、90度回転する。

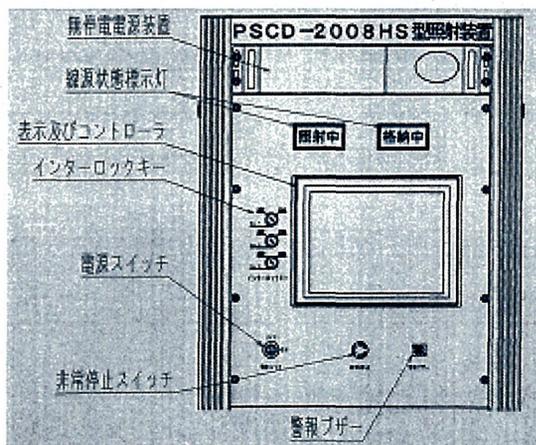


図 2. コントロールパネル

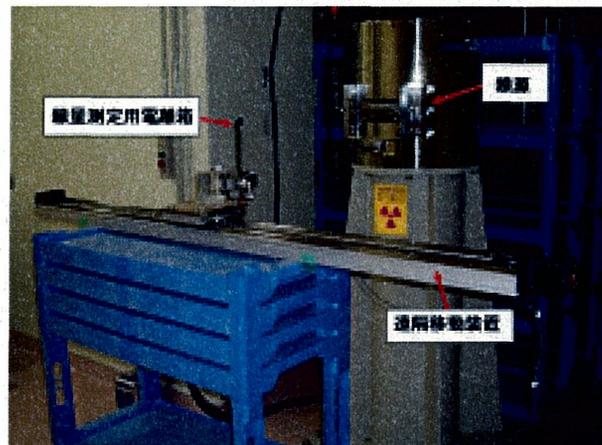


図 4. 電離箱による測定

2. PSCD2008HS 型照射装置内における線質や線量分布の測定

2 方向 2 線源同時照射式スタンド型ガンマ線照射装置「PSCD2008HS 型照射装置」の内、 $296\text{GBq}^{137}\text{Cs}$ 線源からのガンマ線照射場を設計して、その線質や線量分布を決定した。

線質の測定は、図 3 に示すように AMPTEK 社製 CdTe 検出器 XR-100T で、結晶サイズは $3 \times 3 \times 1\text{mm}^3$ 、 $100\mu\text{ベリリウム}$ 、を 1024 ch の MCA にてエネルギースペクトルを測定した。[2]線量測定用電離箱は全て Exradin 社製の、A4 (30cc)、A5 (100cc)、A6 (800 cc) を用いた。図 4 に示すように、電離箱をパルスモーターによるストローク 180 cm の遠隔移動装置に固定して分布測定を行った。[1]

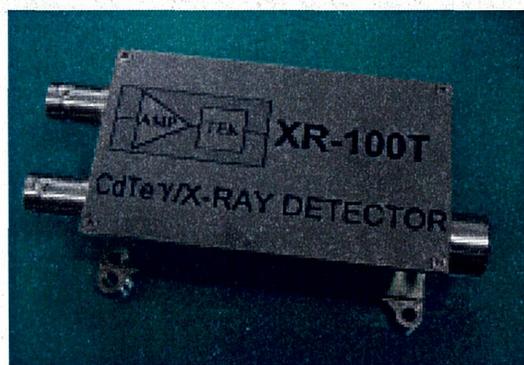


図 3. AMPTEK 社製 CdTe 検出器 XR-100T

3. 結果

3-1. 線質の測定 (CdTe スペクトロメーターによるエネルギー測定)

線質の測定は線量減弱用フィルターが入った場合との違いを検討するため、フィルター無しと 4 種類のフィルター装填時の測定を行った。測定したエネルギースペクトルは図 5 にしめす。ピークチャンネル値はフィルターによって大きくは異なる。しかし、フィルター無しと 1/3 フィルターの FWHM (Full width half maximum) の値はかなり大きいから、パイルアップが影響しているためと思われる。チャンネル数とカウント数をリニアスケールで表したスペクトル下の面積は線量に比例する。電離箱による基準点の線量率とその比と比較して 5% 程度以内では一致しているが、FWHM の値をもっと小さくしたデータであれば両者一致は良くなると考えられる[1]。

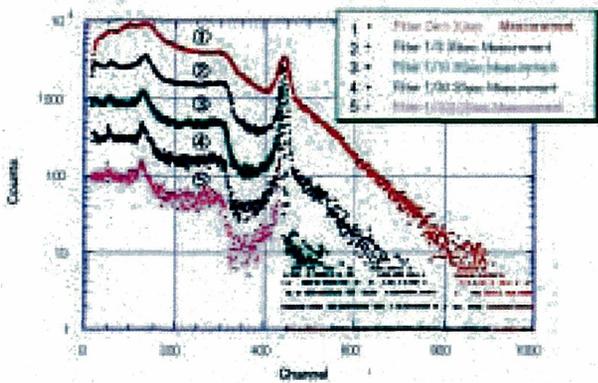


図 5. Filter 通過スペクトル 上から Filter なし (①)・1/3 (②)・1/10 (③)・1/30 (④)・1/100 Filter (⑤) 横軸チャンネル数、縦軸はカウント値

3-2. 線量の測定

照射ビームの中心を通る線をビーム中心軸と称し、線量を表すのに便利なように基準点(ビーム中心軸上の線源から 1 m の点)を設けた。また三次元方向を表すため、左右方向を X 軸、上下方向を Y 軸、ビーム中心軸方向を Z 軸とした[1]。

3-2-1. 中心軸 (Z 軸) 線量分

中心軸の線量分布は A5 と A6 電離箱により測定した。基準点の値を 100 に規格化した結果を図 6 にしめす。実線は測定値の回帰曲線で、測定値と良く一致している。しかし逆二乗則には完全には乗らない。逆 2 乗則からの偏差は、7 m 位置で 5.7% 線量の増加が見られる。これは散乱線の影響と考えられる。この式では基準点の値を 100 に規格化した。[1]

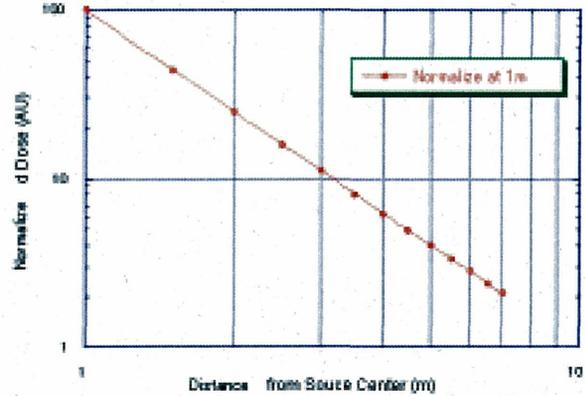


図 6. 基準点の値を 100 に規格化した Z 軸線量分布、横軸は線源中心からの距離

3-2-2. X 軸線量分布

X 軸の線量分布は A5 および A6 電離箱により 1 m、3 m と 5 m をスキャンした。線量分布は図 7 に示す。各分布は中心軸の値を 100 に規格化してある。また横軸は 1 m の値を示し、他の値は幾何学的広がり補正を施した。結果は 1% 程度の違いで良く一致している。また、中心軸に対する左右対称性も良好である。分布に従って、照射室内の線量分布は 1 m の X 軸線量分布と中心軸の線量分布から任意の位置の値が計算できる。[1]

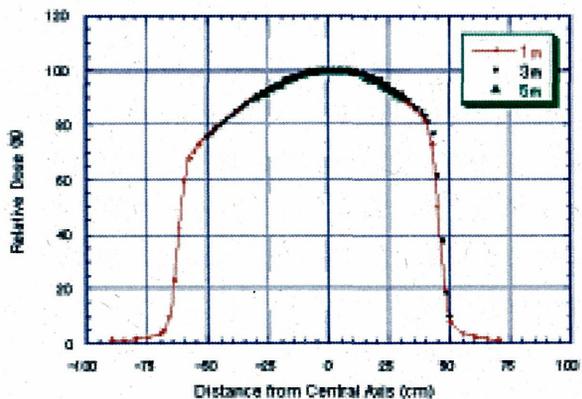


図 7. 線源から 1m の X 軸線量分布に 1m (赤)、3m (黒)、5m (緑) の分布をプロットした図 結果は 1% 程度の違いでそれぞれ良く一致している。

3-2-3.Y 軸線量分布

Y 軸の線量分布は A5 電離箱を用いて基準点を通る軸でのみ測定した。中心軸に対する上下の線量分布の対称性を示す結果を図 8 に与えている。コリメータの開き角度が上下でそれぞれ 10 度に設計されているため、上下方向の線量分布の対称性は全く等しいと言える。ピーク線量に対して 5%以内の線量域は上下方向では 1 m 点で 28 cm 程度である。[1]

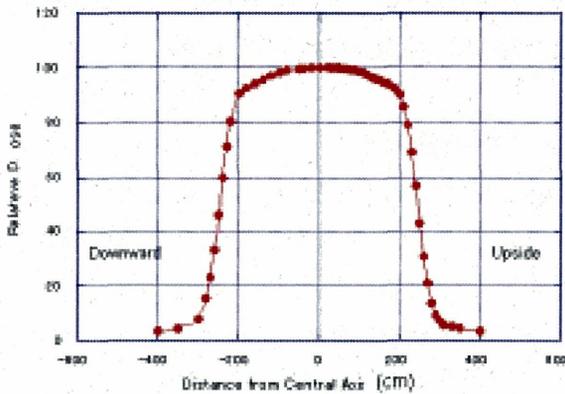


図 8.上下方向の線量分布 縦軸は中心点を 100 に規格化した線量、横軸は上下方向の距離

3-2-4. 照射場の決定

線源から同心円となる距離で線量が中心軸の値と 5%以内になる円を計算し、結果を図 9 に与える。図に示したように 5%以内の線量域は X 軸の直線域で 11° と 13°、同心円では 26° と 20° となる。左右で角度が異なるのはコリメータでの散乱線の影響とコリメータ開角のためである。実際にはこの角度より 2° 程度内側に照射体をセットすることを推奨している。[1]

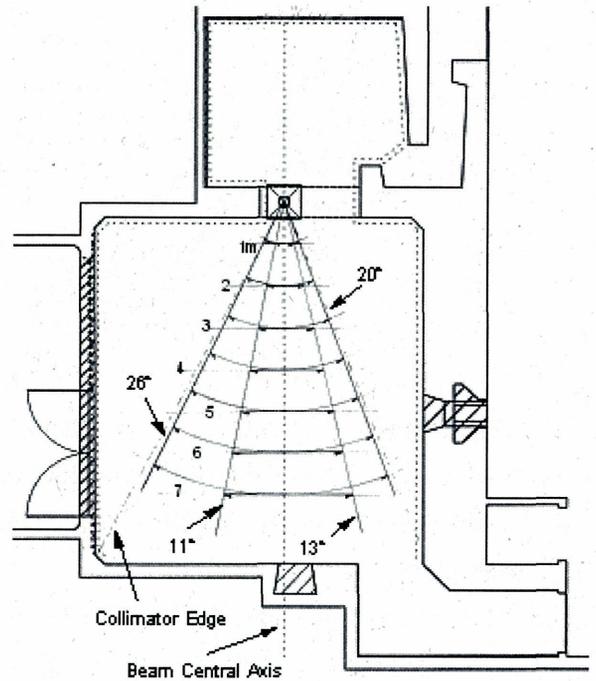


図 9. X 軸および線源からの距離が同一円とする円周内で線量が 5%以内の照射野

3-2-5.基準点吸収線量の決定

A6 (S/N= 258) 電離箱を産業技術総合研究所で 2007 年 11 月に校正を受けたが、校正定数は $\mu\text{C}/\text{kg}$ 単位、high レンジで $N_c = 0.997$ であった。2008 年 1 月 1 日基準点の照射線量は 0.05656R である。但し、線源開閉時におけるタイマー誤差が 1 分当り 0.9634 あるから 2008 年 1 月 1 日の実時間 1 分当りの基準点照射線量 $R = 0.05656 \times 0.9634 = 0.05449$ である。したがって、2008 年 1 月 1 日の吸収体がセルロースの基準点吸収線量率は

$$D_{\text{Cellulose}} = 0.05449 \times 2.58 \times 10^{-4} \times 36.1 \times 60$$

$$= 30.45 \text{ mGy/hr}$$

である。[1]

4. 結論

◎¹³⁷Cs296GBq 射装置による照射場を設計して予定通り結果を得た。

◎4 種類の線量減弱用フィルター挿入によるエネルギースペクトルの変化は、線量変換係数に影響しないことを確認した。

◎上下方向の線量分布は完全に上下対称である。

◎左右方向の線量分布はコリメータの開角が異なり、同心円では右 26° 左 20° の範囲は線量が 5%以内で照射できる。

◎基準点の線量率は 2008 年 1 月 1 日で 30.45mGy/hr である。

◎フィルターの挿入と距離を変えることにより線量率を 730.8~0.6570 mGy/day の照射が可能である。

以上、今回は小線源側の 296GBq137Cs 線源の測定を行ったが、今後 7.4TBq137Cs 線源の測定を行い、ユーザーに開放する予定である。

終わりに

今回の報告では平岡武先生のご指導のもと、測定・検証を行った。また測定についてのデータ・考察は、「ガンマ線棟 296GBq137Cs ガンマ線照射装置の線量測定第 1 報 電離箱による測定」、「ガンマ線棟 296GBq137Cs ガンマ線照射装置の線量測定第 2 報 CdTe Spectrometer, ガラス線量計, IP による測定」から引用させていただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

[1]平岡武,三井大輔,酢屋徳啓,濱野毅,石川剛弘,前田武,ガンマ線棟 296GBq137Cs ガンマ線照射装置の線量測定第 1 報 電離箱による測定 (2007) 1-9

[2]濱野毅,三井大輔,酢屋徳啓,平岡武,石川剛弘,前田武,ガンマ線棟 296GBq137Cs ガンマ線照射装置の線量測定第 2 報 CdTe Spectrometer, ガラス線量計, IP による測定 (2008) 1-9

[3]酢屋徳啓,三井大輔,濱野毅,前田武,石川剛弘,

平岡武,ガンマ線棟 296GBq137Cs 線源によるガンマ線照射場の設定 第 3 回技術と安全の報告会 NIRS-M-213 (2008) 82

ECR イオン源用金属蒸発源の開発

村松 正幸^{*1}、北川 敦志¹、加藤 裕史²、久保 隆史²、佐谷 隆司²、
松井 祐樹²、渡辺 剛吉²、吉田 善一³

1) 放射線医学総合研究所 物理工学部、2) 大阪大学大学院工学研究科、3) 東洋大学 工学部

Received 5 June 2008

要旨

現在 HIMAC(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)では、物理・生物実験に用いるための鉄イオンの供給を行っている。鉄イオンの生成には、ECR(Electron Cyclotron Resonance)イオン源を用いて行っている。また、今後造影剤や新規プローブとしてがんの診断に応用の可能性がある金属内包フラーレンの合成実験を、ECR イオン源を用いて行っている。ECR イオン源において鉄イオンを生成するときには、フェロセン($\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$)を用いることが多い。フェロセンは常温で昇華するため、ECR イオン源においてガスとして扱うことができる。しかし、フェロセンを用いて鉄イオンの生成を行うには、フェロセンに含まれている炭素や水素が問題になる。今回、純度の高い鉄蒸気をつくりだすために、鉄の蒸発源としてインダクションオープンの開発を行った。

Keywords: 金属蒸発源、鉄、誘導加熱、ECR、イオン源

***Corresponding Author:**

村松 正幸 (Masayuki Muramatsu)

e:mail m_mura@nirs.go.jp

1. はじめに

ECR イオン源において鉄イオンを生成するときには、フェロセン($\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$)を用いることが多い。これは、固体試料からイオンを作り出すときには、化合物を昇華させるほうがほかの手法よりも容易だからである。フェロセンは常温で昇華するため、ECR イオン源においてガスとして扱うことができる。しかし、フェロセンを用いた鉄の多価イオンの生成や、金属内包フラーレンの合成を行うには、フェロセンに含まれている炭素や水素が問題になる。

多価イオンの生成の場合、フェロセンに含まれる炭素や水素が、ガスマキシング法[1,2]におけるミキシングガスの働きをする。ガスマキシング法は 1983 年にオランダの A.G.Drentje らによって発見された、ECR イオン源において多価イオンをふやすための手法である。ECR イオン源内において目的とするイオンとは別の軽いイオン(ミキシングガス)を同時に生成すると(代表的な例として、アルゴン生成時に酸素を混ぜる)、目的のイオンが軽いイオンと衝突し冷却され、イオンの閉じ込め時間を長くすることができる。軽いイオンは、目的のイオンとの衝突により運動エネルギーを得て、目的のイオンより早くプラズマから流出する。これにより軽いイオンの運動エネルギーが、また目的のイオンに戻ることがなくなる。ここで重要になるのは、目的のイオンに対するミキシングガスの質量と割合である。フェロセンを用いてイオンを生成する場合は、目的のイオン(鉄)とミキシングガス(炭素と水素)の割合が一定なため、多価イオンを生成するのに最適な状態を作り出すのが困難である。ECR イオン源において鉄内包フラーレンの生成を行うにあたって重要なことは、1. イオンの閉じ込め時間を長くする、2. それぞれ純度の高いフラーレンおよび鉄のプラズマを生成する。の二つである。これは、 C_{60} と不純物が出会う確率を上げるためと、質量分析を容易にするためである。

フェロセンを用いて金属内包フラーレンの合成を行う場合、フラーレンと鉄以外に粒子が多く存在するため、衝突する確率が下がるのと、イオンの分析が困難になる。

これらの問題点を解決するためにできるだけ純度の高い鉄の蒸気を発生させる必要がある。鉄の融点は 1500°C 以上と高いため、純度の高い蒸気をつくりだすには非常に困難となる。図 1 に鉄の蒸気圧曲線を示す[3]。ECR イオン源の動作圧力において、鉄蒸気の要求圧力は $10^{-2} \text{ Pa} \sim 1 \text{ Pa}$ である。この蒸気圧になる温度は 1350 から 1450°C であり、これを目標温度とした。鉄の融点(1540°C)以下にて固体の鉄から直接蒸気を、必要蒸気圧獲得できることがわかる。

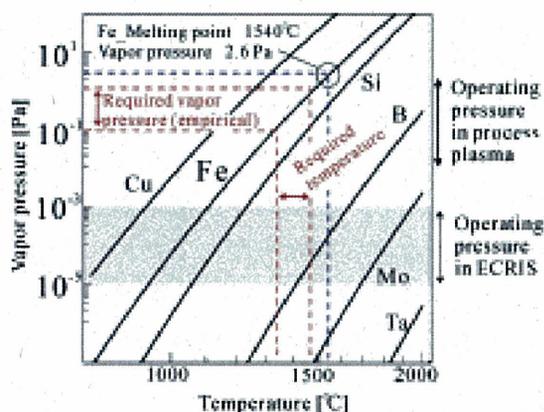


図 1 鉄の蒸気圧曲線。

過去に Kei2-source[4]において、抵抗加熱式の高温オープンを用いて合成試験を行ったが、蒸発源に使われている絶縁物(BN:窒化ホウ素)から高温により放出される窒素が多く観測され、純度の高い鉄蒸気を得ることができなかった。高温オープンとは、富山県立大学(当時)の加藤氏が ECR イオン源にて多価イオンを生成するのを目的として開発した、抵抗加熱を利用した鉄の蒸発源である[5]。この高温オープンでは間接的に試料を温めることから、加熱に関してはあまり効率が良いとはいえなかった。

純度の高い鉄の蒸気を得るために富山県立大学の加藤氏は、加熱方法を誘導加熱に変更することによって、効率よく加熱できると考えた[6]。本研究では、大阪大学の加藤氏(富山県立大学から大阪大学へ異動)の誘導加熱を利用したオープン(以下インダクションオープン)を共同開発し、これを鉄蒸発源として鉄内包フラーレンの合成を目指した。

2. インダクションオープンの製作

2-1 誘導加熱の原理

誘導加熱とは、高周波加熱の一種で、交流磁場内に被加熱体として金属のような電気良導体を置くと、電磁誘導作用により渦電流損失を生じさせ被加熱体を加熱させることである。コイルに交流電流を流すと、その周りに向きと強度の変化する磁力線が発生する。その近くに金属試料を置くとこの変化する磁力線の影響を受けて、金属の中に渦電流が流れる。金属には通常電気抵抗があるため、金属に電流が流れると $\text{電力} = \text{電流}^2 \times \text{抵抗分}$ のジュール熱が発生して金属が加熱される。

2-2 コイルの製作

蒸発源として使われるインダクションオープンのコイル線材においては、銅のパイプが多く用いられている。これは、コイルの小型化を考えた場合、コイルのターン数を減らして電源の出力を上げたほうが有効だからである。RFの電流を流す場合、銅は電気伝導が良かったため、表皮効果により銅線表面に電流が集中し発熱してしまう。従って冷却水を通すためにパイプ状とする必要がある。今回蒸発源の設計を行うにあたって、高温時にコイル線材が劣化してしまうということを考慮し、コイル線材を高融点材料(モリブデン)とした[3]。モリブデンを選択した理由は、高融点材料の中では抵抗値が小さいことおよび、比較的安価に手に入れることができるためである。また銅より電気伝導が悪いため、モリブデン

線の表面に電流が集中することなく、線自体が発熱することが無いので、冷却が必要なくなり構造がシンプルになるという利点もある。

今回、モリブデン線で多層のコイルを作製してくれる業者を探索したが、なかったために自らの手で巻くこととした。モリブデンが金属として硬い性質を持っているために、銅のコイルの場合と異なり、コイルを巻くためのステンレス製の治具を要した(図2参照)。しかし、硬い材料であるためにコイルに加工する時に十分に力を加えなければ、応力が働いて変形してしまう。このことを回避するために、旋盤に治具を固定してモリブデン線に張力をかけてコイルを巻くこととした。かけられる張力に限界があるために、治具から取り外したときに、コイルに巻き戻りが生じて実際に巻いた径より大きくなってしまい、巻数が減少してしまった。このために、治具を用いて1~3層を巻き、4層目は治具を使用せずに3層目の上に直接巻くこととした。4層コイルが出来上がった後に、3, 4層目の絶縁を保持するために、アルミナのビーズを隙間なく挿入した。その後に、それぞれの層間の絶縁保持のために絶縁管を挿入した。また、各層の線間の絶縁を保持するために、出来上がったコイルを引き伸ばした。完成したコイルを図3に示す。

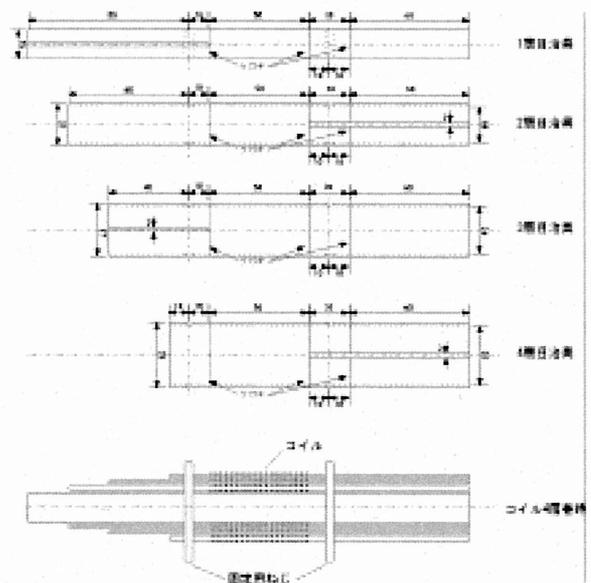


図2 モリブデン線コイル作製用治具。

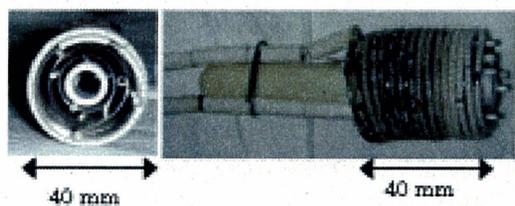


図3 モリブデン線を用いた4層コイル。

実際に使用する場合は、輻射によって試料の温度が下がるのを抑えるために、コイルの外側にステンレス製のシールドを取付けた。完成したインダクションオープンの概略図を図4に、写真を図5に示す。シールドを含むオープンの外形は43 mmで長さが100 mmである。φ1のモリブデンワイヤーを4層構造にして巻き、そこに高周波電力を導入し磁場を発生させている。コイルの内径が15 mmで外径が40 mmである。コイルの中心にセラミックの坩堝を置き、その中に試料である鉄を入れる。鉄の試料は、径が5 mmで、長さが20 mmである。4層目のコイルには、輻射熱を抑えるためのシールドとの電氣的接触を防ぐために、セラミックビーズを取り付けた。電源の仕様は、周波数が30-40 kHz、最大出力が2 kWである。電源が正常に動作するための負荷側のインダクタンスと抵抗はそれぞれ、10-80 μH と 0.2-1.5 Ω である。製作したコイルのインダクタンスと抵抗はそれぞれ 68 μH と 0.71 Ω であり、電源の動作範囲内である。

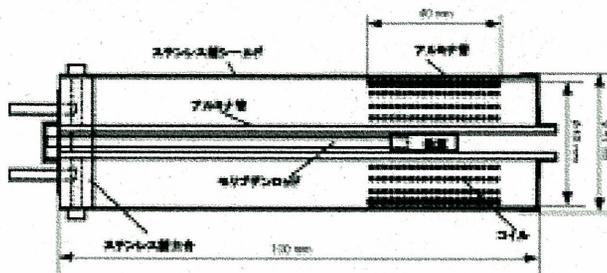


図4 インダクションオープンの概略図。



図5 インダクションオープンの外観。

3. 加熱試験

3-1 コイルの設置

インダクションオープンの動作確認のために Kei2-source において、鉄イオンの生成およびその引き出し実験を行った。図6に Kei2-source にインダクションオープンを設置したときの概略図を示す。インダクションオープンの外径が40 mmと大きいため、プラズマチェンバー内に設置することはできなく、上流側ミラーピークから180 mm上流に設置した。

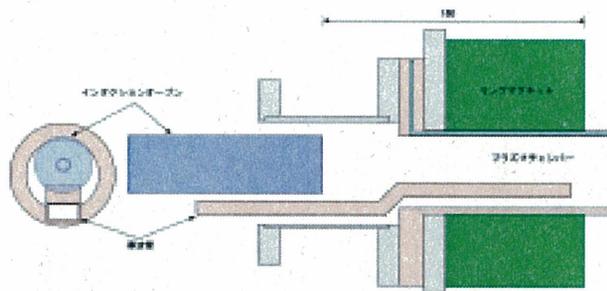


図6 インダクションオープンの設置したときの Kei2-source の概略図

3-2 ビームテスト

図7にビームテストで得られた鉄の価数分布を示す。今回の実験では、鉄の蒸気だけではプラズマを維持することができなかったため、サポートガスとしてヘリウム(He)を使用した。イオン源のパラメータは鉄の9価に最適化した。サポートガスは He、流量は 0.376 cc/min プラズマチェンバー内の真空度は、約 5.0×10^{-3} Pa であった。マイクロ波の周波数と

パワーはそれぞれ、10.061 GHz と 150 W である。パルス運転で、繰り返しが 5 Hz、パルス幅が 50 msec である。Fe⁹⁺ビーム強度としては、最大で 2 μ A 得られた。引出電圧は+16 kV である。多価としては 13 価まで観測することができた(ビーム強度は 0.3 μ A)。しかし、イオン源内にまだ不純物が多く、炭素、窒素、酸素なども観測できた。Kei2-source は通常炭素イオンの生成実験を行うため、プラズマチャンパーに炭素が付着している。この炭素が鉄イオン生成時にプラズマによってスパッタされ、チャンパー壁からでてきているのだと考えられる。また酸素は、イオン源の大気開放時にチャンパー壁に付着した水もしくは、オープン本体で使用しているアルミナ(Al₂O₃)からきていると考えられる。チャンパー壁から来ている水は、プラズマによって温度が上がり出てきているのだと考えられる。アルミナからの酸素は、モリブデンワイヤーの加熱や、鉄からの輻射熱で加熱して放出されていると考えられる。窒素はイオン源の真空リークから来ていると考えられる。

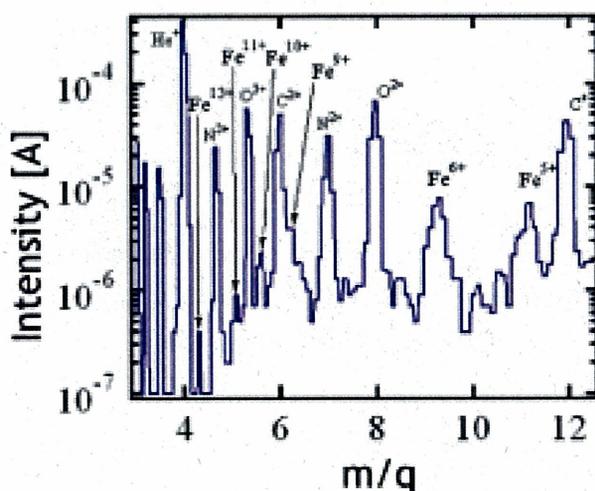


図7 鉄の価数分布。

4. 新型インダクションオープンの開発

今回の実験で用いられたインダクションオープンでは、多くの酸素が観測された。原因の一つとして、オープン本体で用いている絶縁物(アルミナ: Al₂O₃)からきていると考えら

れる。したがって、オープン運転中に酸素などのアウトガスができるだけ放出されない、新しいオープンの開発が必要となった[7]。実験で用いたオープンでは、3層目と4層目のコイル、4層目と外側に設けてあるシールドとの間で絶縁する必要があったので、多くのセラミックビーズが使用されていた。またコイル間の絶縁のために、絶縁管が使用されていた。新型インダクションオープンでは、以下の2つの点に注意して設計を行った。1) 4層目とシールドとの間には十分なスペースをとる。2) コイル層間での接触が無い様にコイルを4つ別々につくりしっかり固定する。図8に試作の新型インダクションオープンの詳細図を、図9に写真を示す。オープンの外径は 47 mm で長さが 165 mm である。蒸気はオープン先端部分に開けられた径 10 mm の穴から取り出される。コイルは、径 1.5 mm のモリブデンワイヤーで、4層すべて独立に製作してある。コイル以外の金属部品はすべてステンレス製である。今後 1500°C以上の高温に上げる場合には、このステンレス部品をすべて高融点材料にする必要があるが、今回は鉄の蒸発を目的としているため、ステンレスで十分だと考えられる。図中の黒く塗りつぶしている部分が絶縁物である。前回のものと比べて絶縁物の使用量が格段に減っているのがわかる。今後は、テスト用の真空チャンパーで加熱試験を行ったあと、イオン源での金属イオンの生成実験を行う予定である。イオン生成試験後に、フラーレンとの合成実験を行う予定である。

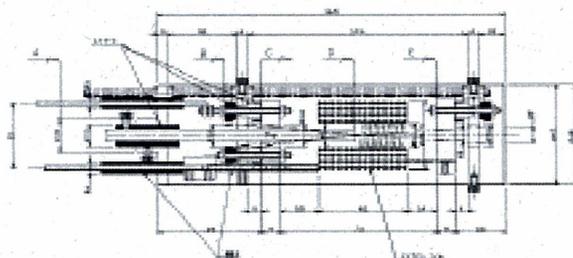


図8 新型インダクションオープンの詳細図

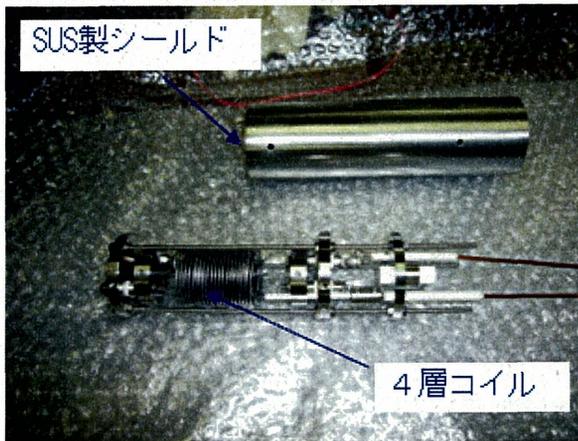


図9 新型インダクションオーブン

5. まとめ

今回、純度の高い鉄の蒸気を得るために、誘導加熱を利用したオーブンの開発を行った。本体の構造は、モリブデン製の4層のコイル状のものとなっている。Kei2-sourceにおいての多価イオン生成実験を行った結果、最大13個の鉄イオンを得ることができた。しかしながら、得られたスペクトル上からは、酸素が多く見られた。これはチェンバー壁に付着した水もしくは、オーブン本体に使われている絶縁物からきていると考えられる。プラズマチェンバーから放出されている部分が大きければイオン源の清掃のみで解決できるが、本体の絶縁物から原因の場合は絶縁物を無くす構造にしなければならない。そこで、絶縁物をできるだけ少なくしたインダクションオーブンの開発を行った。

参考文献

- [1] A. G. Drentje, *Nucl. Instrum. Methods B*, 9 (1985) 526
- [2] A. G. Drentje, *Review of Scientific Instruments*, 74 (2003) 2631
- [3] 久保隆史, 2007年修士論文, 大阪大学
- [4] M. Muramatsu, A. Kitagawa, Y. Sakamoto, S. Sato, Y. Sato, H. Ogawa, S. Yamada, H. Ogawa, Y. Yoshida, A. G. Drentje, *Review of Scientific Instruments*, 76 (2005) 113304 1-6

- [5] Y. Kato, M. Tomida, and S. Ishii, *Review of Scientific Instruments*, 75 No. 5 (2004) 1919-1921
- [6] Y. Kato, T. Kubo, M. Muramatsu, K. Tanaka, A. Kitagawa, Y. Yoshida, T. Asaji, F. Sato, T. Iida, *Review of Scientific Instruments*, 79 No. 2 (2008) 02A312 1-4
- [7] Y. Matsui, T. Watanabe, T. Satani, M. Muramatsu, K. Tanaka, A. Kitagawa, Y. Yoshida, F. Sato, Y. Kato, T. Iida, *proceedings of 17th International Conference on Ion Implantation Technology (IIT08)*, to be published.

浜松医科大学・医学部附属動物実験施設における技術研修報告

上野 渉*¹

1) 基盤技術センター研究基盤技術部実験動物開発・管理課

Received 9 June 2008

要旨

近年、放射線医学・科学研究の分野の動物実験で遺伝子改変マウスや疾患モデル動物を用いた研究が増大しており、今後、放医研で維持・生産するマウスについてもそのニーズに応える必要があると思われる。したがって当所で維持・生産されている系統および研究者より要望のある系統について、より適正かつ効率的な維持・生産方法を築く必要がある。そこで関連技術の習得を目的に、浜松医科大学・医学部附属動物実験施設において 1. 熊本大学 CARD に寄託されたマウス系統の PCR 法による遺伝子型のタイピング 2. 遺伝子改変マウスおよび疾患モデルマウス系統の維持・生産技術 3. 大学の動物実験施設の施設管理および運営方法等の内容で 3 ヶ月間訪問共同研究員として研修した。また、研修終了後も訪問共同研究員を継続して当所において 1. の未検索遺伝子座位のタイピングをおこなったので報告する。

Keywords : DNA、PCR、電気泳動、遺伝子型、マウス、マイクロサテライトマーカー

***Corresponding Author:**

上野 渉(Wataru Ueno)

e:mail: ueno@nirs.go.jp

1. はじめに

今回の技術研修を受け入れていただいた浜松医科大学・医学部附属動物実験施設 [1] (以下、動物施設) は昭和 52 年に建設され、その後 2 回の増築を経て現在に至っている。主な施設概要を表 1 に示す。

表 1 動物施設概要

職員構成	施設長：1 名 (兼任) 准教授：1 名 助教：1 名 技術専門職員：2 名 技術補佐員：6 名 教務補佐員：1 名 事務補佐員：1 名
延面積	2,759m ² (地下 1 階～4 階)
飼育収容可能数	マウス：11,300 匹 ラット：3,700 匹
飼育動物種	マウス、ラット、ハムスター、モルモット、スナネズミ、ウサギ、イヌ、サル、マーモセット他

また、当施設では表 2 に示す様な文部科学省系統保存事業費による疾患モデルマウス系統および施設独自に開発されたミュータント系統の維持 [2] を行っていることから実験動物遺伝学および実験動物資源学において高い水準にある。

表 2 疾患モデル系統一覧 (抜粋)

系統名	特徴
C57BL/Ks- <i>Lepr</i> ^{db}	糖尿病
C57BL/6J- <i>Lep</i> ^{ob}	肥満、糖尿病
KK- <i>A</i> ^y	肥満、糖尿病
C57BL/6- <i>MoBr</i>	銅代謝異常
<i>hobt</i>	甲状腺機能低下



図 1 動物施設で維持されている肥満症マウス (左：正常、右：異常)

2. 材料・方法

2-1. 実験主旨

熊本大学動物資源開発研究部門 [3] (Center for Animal Resources and Development) より受領したマウス 158 系統のうち、動物施設で行った遺伝子型タイピング (検査対象のマイクロサテライトマーカ：D1Mit416 (DNA segment, Chr 1, Massachusetts Institute of Technology 416: 1 番目の染色体上のマサチューセッツ工科大学で 416 番目に合成されたプライマー)、D4Mit53、D6Mit15、D9Mit51、D17Mit16) によりヘテロが判明している 48 系統を除く 110 系統について遺伝子型タイピングを行う。

CARD は、研究支援機関として国内外の研究者が作製した遺伝子改変マウス (突然変異を含む) を収集し、胚や精子を凍結保存して依頼者の要望に応じて供給するシステムである。実験の主旨は、その CARD に寄託されたマウス系統の凍結された胚を融解し、生体のマウスが得られた際に目的とする系統か否かを確かめるための事前モニタリングである。

今回検査対象としたマイクロサテライトマーカは、D2Mit61、D5Mit18、D7Mit68、D8Mit88、D11Mit103 の 5 マーカでおこなった。

2-2.DNA 抽出

マウスの組織（耳片、肝臓、尾）をエッペンドルフチューブにとり、DNA 抽出用緩衝液（1M Tris-HCl : pH8.0、0.5M EDTA.2Na、5M NaCl、10% SDS、50 μ g/ml Proteinase K）を 500 μ l 加え、55 $^{\circ}$ C で 1 時間振盪した、続いて、Phenol/Chloroform/Isoamyl alcohol（株）ニッポンジーン）を 500 μ l 加えて混和後、15,000rpm で 10 分間遠心した。上清を別のエッペンドルフチューブに移し、100%エタノールを 1,000 μ l 加えて混和後、15,000rpm で 10 分間遠心し、DNA を沈殿させた。最後に、沈殿した DNA を 70%エタノールを用いて洗浄し、エッペンドルフチューブ内で DNA を乾燥させた。TE（Tris-HCl、EDTA）に溶解し、DNA 溶液として以後の実験に用いた。

2-3.PCR（Polymerase Chain Reaction）法

TAKARA Taq（タカラバイオ（株））に添付の試薬を表3のように Axygen バイオサイエンス社チューブに混合し、ミネラルオイル（シグマアルドリッチジャパン（株））を滴下し、プログラム編集型サーマルコントローラー（エムジェイジャパン（株））を用いて以下の条件で PCR を行った。

表 3 PCR 試薬

1) 滅菌水	14.4 μ l
2) 10 \times PCR 緩衝液	2.0 μ l
3) dNTP 混合液	1.5 μ l
4) rTaq ポリメラーゼ	0.1 μ l
5) プライマー-F (forward)	0.5 μ l
6) プライマー-R (reverse)	0.5 μ l
7) DNA 溶液	1.0 μ l

PCR 条件

- 熱変性反応 94 $^{\circ}$ C 2 分 1 サイクル
- DNA 増幅反応 94 $^{\circ}$ C 20 秒 30 サイクル
55 $^{\circ}$ C 30 秒
72 $^{\circ}$ C 30 秒
- 追加伸長反応 72 $^{\circ}$ C 5 分 1 サイクル

2-4.電気泳動法

PCR 産物は Loading Buffer（株）ニッポンジーン）と混合し、3%アガロースゲル（アガロース ME：岩井化学薬品（株））の各ウェルに 20 μ l ずつアプライして、Mupid ミニゲル泳動槽（株）アドバンス）を用いて、泳動用緩衝液として Tris-borate-EDTA を使用し、エチジウムブロマイド（シグマアルドリッチジャパン（株））を泳動用緩衝液の陽極側に 2.5 μ l 添加した後、100V 50 分間電気泳動を行った。電気泳動後、撮影装置 FAS-III（東洋紡績（株））を用いて泳動像を撮影した。



図 1 アガロースゲル電気泳動法による遺伝子型タイピング判定例

PCR 産物をアガロースゲルに入れ電気泳動法により一定時間流動し（図上 \rightarrow 下）、各マーカーにおいて PCR 産物の小さい（易動度の早い）ものから a、b、c とした。

また、PCR 産物の大小の差がなく判定し難い系統においては、アガロースゲル電気泳動より解像度が鮮明なポリアクリルアミドゲル電気泳動法による銀染色法を用いて大小の判定を行った。

ポリアクリルアミドゲル作製に使用した溶液を以下のように示す。

A-1：40%アクリルアミド（アクリルアミドモノマー（半井化学（株））39g、ビスアクリルアミド（Kodak 社）1g、グリセリン 20.0ml を蒸留水（DW）で 100ml にメスアップ）

A-2：40%アクリルアミド（アクリルアミドモノマー38g、ビスアクリルアミド 2g、グリセリン 20.0ml を蒸留水（DW）で 100ml にメ

スアッ)

B-1: トリスバッファー (トリス 9.15g を DW に溶かし濃塩酸 3.0ml を加え 100ml にメスアッ)

B-2: トリスバッファー (トリス 1.5g を DW に溶かし濃塩酸 1.0ml を加え 100ml にメスアッ)

C: 0.4%過硫酸アンモニウム (DW で調整)

D: 2%TEMED (半井化学 (株)) (DW で調整)

15%の Running gel を作製するために A-1、B-1、DW、C および D を 7.5ml : 5.0ml : 5.75ml : 1.25ml (計 20.0ml) の比で混合し、2 枚合わせたガラス板間に注入した後、DW を重層してゲルの固化を待った。完全に固化したことを確認した後、Running gel 上に重層した DW を注射器で取り除き、コームを 2 枚のガラス板の間に差し込んで、Stacking gel 溶液を注入した。Stacking gel は A-2、B-2、DW、C および D を 0.4ml : 1.0ml : 0.5ml : 0.5ml (計 4.0ml) の比で混合して作製した。

PCR 産物を Loading Buffer と混合した後、ゲル試料穴に 10 μ l ずつ注入し、泳動用緩衝液として Tris-glycine を使用し、エチジウムブロマイドを泳動用緩衝液の陽極側に 2.5 μ l 添加した後、ゲル 1 枚あたり 15mA の定電流でゲルの下端に来るまで (約 1 時間 30 分) 電気泳動した。

電気泳動終了後、ゲルを固定液 (酢酸、メタノールおよび DW を 12ml : 50ml : 38ml の割合で混合) に浸し、20 分間振盪した。続いて、40ml の処理液 I [重クロム酸カリ (2.0ml/1000ml) : 硝酸 (4.8ml/1000ml) = 1 : 1] に 30 分間浸漬し、次に 100ml の処理液 II [硝酸銀 (2.0ml/1000ml)] に入れ 30 分振盪した。その後、ゲルを処理液 III [無水炭酸ナトリウム (29.7g/1000ml)、ホルマリンを 1000ml : 0.5ml の割合で混合] に移し、バンドが現れるまでゆっくりと振盪した。明瞭なバンドを確認できたら 5%酢酸を加えて銀反応を止め

た。

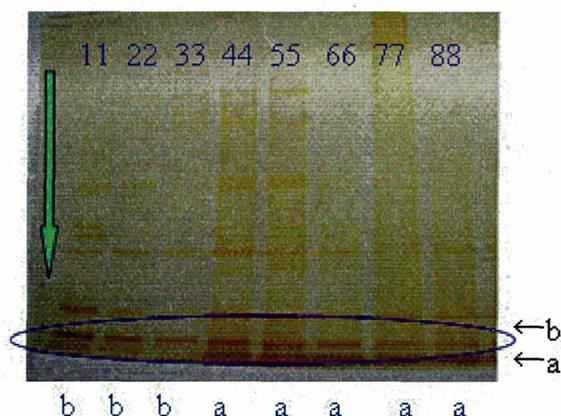


図2 ポリアクリルアミドゲル電気泳動法による銀染色法の遺伝子型タイピング判定例

3. 結果および考察

研修期間中に 110 系統の検索対象の遺伝子座位 550 座位中、476 座位 (86.5%) についてタイピングを終了した。動物施設より平成 20 年度末まで訪問共同研究員を継続し、残りの 74 (14.5%) の未検索座位について放医研で調べるよう指示され、平成 20 年 2 月 8 日に 550 座位の全てを完了した。(別表 4~8)

今回行った 5 マーカー (D2Mit61, D5Mit18, D7Mit68, D8Mit88, D11Mit103) の結果と動物施設が行った 5 マーカー (D1Mit416, D4Mit53, D6Mit15, D9Mit51, D17Mit16) の計 10 マーカーによるタイピング結果を統合した結果、トランスジェニック系統では、C57BL/6 が遺伝的背景の 28 系統のうち 21 系統 (75%) について C57BL/6 と同型を示し、ターゲットドミューテーション系統では、C57BL/6 と同型は 41 系統のうち 20 系統 (約 61%) だった。

また、トランスジェニック系統の 63.6%、ターゲットドミューテーション系統の 50%が C57BL/6 の遺伝的背景の系統だった。

以上から遺伝子改変マウスには C57BL/6 の系統が多用されていることがわかった。

4. まとめ

取得した技術の今後について

- 1) 放医研で系統維持されている近交系マウス 15 系統について、放医研独自の PCR 法による遺伝学的モニタリングシステムを確立する。
- 2) C57BL/6J-*Lep^{ob}*、BALB/c-*nu/nu*、C57BL/6J-*bg-nu* マウスをはじめとして遺伝子改変マウスの遺伝子型タイピングおよび系統維持に応用できる。
- 3) 浜松医科大学・医学部附属動物実験施設の管理・運営について、当所の動物施設の管理・運営において参考になった点を取り入れる。

謝辞

今回の技術研修において研修生として受け入れ、ご指導いただいた浜松医科大学・医学部附属動物実験施設の加藤秀樹准教授、高林秀次助教に御礼申し上げます。

また、今回の研修の機会を与えて下さり、多大なご尽力をいただいた西村義一前基盤技術センター長、松下悟基盤技術副センター長、今関等研究基盤技術部長、吉田俊雄安全・施設部長、鈴木貴総務部長、西川哲実験動物開発・管理課長に謝意を表します。

参考文献

[1]浜松医科大学・医学部附属動物実験施設ホームページ

<http://www2.hama-med.ac.jp/w3a/animal/index.html>

[2] 浜松医科大学・医学部附属動物実験施設で維持されている系統のリストのホームページ

<http://www2.hama-med.ac.jp/w3a/animal/page28.html>

[3] 熊本大学 CARD ホームページ

<http://card.medic.kumamoto-u.ac.jp/index.html>

別表 4 熊本大学 CARD に寄託されたマウス系統の遺伝子型タイピング結果 1

CARD ID	系統の種別	系統名	DWIt416	D4Mit53	D6Mit15	D9Mit51	D17Mit16	D2Mit61	D5Mit18	D7Mit68	D8Mit68	D11Mit103
432	ターゲットミューテーション	96;129-<i>Hba2</i>(sup)mi1<sup></i>	a	a	a	b	b	bia	bia	b	b	b
373	近交系	A.1s7(sup)<sup></sup>	b	bia	b	b	ca	b	b	bia	bia	b
376	近交系	A.1s18(sup)<sup></sup>	b	bia	bia	bia	a	a	b	bia	bia	b
476	トランスジェニック	96-<i>Tg(Actb-Adra1d)</i>96<i></i>	bia	bia	bia	bia	ca	ca	b	bia	bia	a
387	ターゲットミューテーション,トランスジェニック	96;129-<i>Ednrk</i>(sup)mi1<sup></sup>	bia	bia	bia	bia	ca	ca	b	bia	bia	a
508	ターゲットミューテーション	96;129<i>-</i>4Fap1(sup)mi2<sup></sup>	b	ab	b	ab	c	c				
499			ab	ab	ab	ab	c					
500			ab	a	ab	ab	c					
469	ターゲットミューテーション	96;129-<i>Fomh</i>(sup)mi1<sup></sup>	ab	a	ab	ab	c					
470	ターゲットミューテーション	96;129-<i>Fomh</i>(sup)mi2<sup></sup>	a	a	bia	b	c					
498	トランスジェニック	96-<i>Tg(CAG-19PP)</i>1<i></i>	bia	bia	bia	bia	ca	ca	b	bia	bia	a
467	トランスジェニック	96;129-<i>Tg(Nodal)</i>	a	a	ab	a	ac					
468	トランスジェニック	96;129-<i>Tg(Nodal)</i>	bia	a	ab	b	ca	ca	b	bia	bia	b
449	ターゲットミューテーション	96;129-<i>Gpr30</i>(sup)mi1<sup></sup>	bia	bia	bia	bia	ca	ca	b	bia	bia	a
501			b	b	ab	b	c					
502			ab	ab	bia	bia	c					
377	近交系	A.1s11(sup)<sup></sup>	b	bia	bia	bia	a	a	b	bia	bia	b
477	挿入突然変異	96;129-<i>Mirpa1</i>(sup)mi1<sup></sup>	ab	ab	a	a	c					
480	ターゲットミューテーション	96;129-<i>Me1</i>(sup)mi1<sup></sup>	ab	a	bia	bia	c					
481	ターゲットミューテーション	96;129-<i>G61906A</i>(sup)mi1<sup></sup>	bia	bia	bia	bia	ca	ca	b	bia	bia	a
478	挿入突然変異	96;129-<i>Mirpa1</i>(sup)mi2<sup></sup>	b	b	b	b	c	ab	b	bia	bia	a
359	ターゲットミューテーション	96;129-<i>Adra1c</i>(sup)mi1<sup></sup>	b	b	bia	bia	ca					
474	トランスジェニック	96-<i>Tg(Actb-Avpr1b)</i>29<i></i>	bia	bia	bia	bia	ca	ca	b	bia	bia	a
517	ターゲットミューテーション	96;129-<i>Msr1</i>(sup)mi1<sup></sup>	bia	bia	a	a	ca	ca	b	bia	bia	a
460	近交系	A.1s1(sup)<sup></sup>	b	bia	bia	bia	a	a	b	bia	bia	b
450	ターゲットミューテーション	96;129-<i>Rumt</i>(sup)mi1<sup></sup>	b	ab	bia	bia	c					
518	ターゲットミューテーション	96;129-<i>Msr1</i>(sup)mi1<sup></sup>	bia	bia	bia	bia	ca	ca	b	bia	bia	a
558	ターゲットミューテーション	96;129<i>-</i>Vilb(sup)mi1<sup></sup>	a	a	a	b	ca	ca	b	bia	bia	ab
543	ターゲットミューテーション	96;129-<i>Fez2</i>(sup)mi1<sup></sup>	ab	a	bia	bia	c					
406	ターゲットミューテーション	96;129-<i>Id1</i>(sup)mi1<sup></sup>	bia	bia	ab	a	c					
436	トランスジェニック	C3H/Hea-<i>Tg(Thy1.2)</i>	a	bia	bia	bia	a	a	a	b	b	b

別表5 熊本大学 CARD に寄託されたマウス系統の遺伝子型タイピング結果 2

CARD ID	系統の種別	系統名	D1Mit1416	D4Mit153	D6Mit115	D9Mit151	D17Mit16	D2Mit161	D5Mit18	D7Mit68	D8Mit88	D1Mit103
539	ターゲッドコミュニティ	06.129-<i>C10mk</i>sup</i>	b a	ab	ab	ab		c a	b	b a	a	
503			ab	ab	ab	ab		c				
471	自然・人為的変異	06-<i>H10mk</i>sup</i>	b a	a	a	a	a	a	b	b a	a	
375	近交系	A.62<i>sup</i>	b	b a	b a	b a	b a	a	b	b a	b a	b
542			b a	a	a	b	ac					
366			a	a	a	b	b	a	b	b b		b
535	ターゲッドコミュニティ	06.129-<i>D10mk</i>sup</i>	b a	b a	b a	b a		c a	b	b a	a	
545	トランスジェニック	0578/76-<i>C10</i>	b a	b a	b a	b a		c a	b	b a	a	
563			ab	a	b	ab		c				
556	ターゲッドコミュニティ	09.129-<i>I10st</i>sup</i>	ab	a	b	b	ac					
527	ターゲッドコミュニティ	06.129-<i>K10st</i>sup</i>	b a	ab	ab		c					
528	ターゲッドコミュニティ	06.129-<i>K10st</i>sup</i>	b a	b a	b a		c a		b	b a	a	
529	ターゲッドコミュニティ	06.129-<i>D10mk</i>sup</i>	b	b a	b a	b a	b a	a	a	ab	b	ab
547	トランスジェニック	06.102-<i>C10</i>	b a	ab	ab		c					
546	トランスジェニック	0578/76-<i>C10</i>	b a	b a	b a		c a		b	b a	a	
537	ターゲッドコミュニティ	02.129-<i>D10mk</i>sup</i>	a	a	a	b	b	b a	b a	b	b	b
538	ターゲッドコミュニティ	02.129-<i>D10mk</i>sup</i>	a	a	a	b	b	b a	b a	b	b	b
534	ターゲッドコミュニティ	06.129-<i>D10mk</i>sup</i>	b a	b a	b a		c a		b	b a	a	
531	トランスジェニック	06.109-<i>C10</i>	b a	b a	b a		ac					
540	ターゲッドコミュニティ	06.129-<i>D10mk</i>sup</i>	b a	b a	b a		c a		b	b a	a	
514	ターゲッドコミュニティ	06.129-<i>K10st</i>sup</i>	b a	b a	b a		c a		b	b a	a	
507	ターゲッドコミュニティ	06.129-<i>C10</i>	b a	b	b	ab		c				
437	トランスジェニック	03/06-<i>C10</i>	a	b a	b a		b a		a	b	b	b
407	ターゲッドコミュニティ	06.129-<i>K10st</i>sup</i>	b a	b a	b a		c a		b	b a	a	
436	トランスジェニック	03/06-<i>C10</i>	a	b a	b a		b a		a	b	b	b
406	ターゲッドコミュニティ	06.129-<i>D10mk</i>sup</i>	b a	ab	ab		c					
452	ターゲッドコミュニティ	06.109-<i>C10</i>	b a	b a	b a		c a		b	b a		b
453	ターゲッドコミュニティ	06.109-<i>C10</i>	b a	b a	b a		c a		b	b a		ab
404	ターゲッドコミュニティ	06.129-<i>C10</i>	b a	b a	b a		c a		b	b a	a	
462			b a	b a	b a		c a		b	b a	a	
408	ターゲッドコミュニティ	06.129-<i>C10</i>	b a	a	a		c a		b	b a	a	

別表 6 熊本大学 CARD に寄託されたマウス系統の遺伝子型タイピング結果 3

CARD ID	系統の種別	系統名	DIM1416	DAM153	D6M115	D6M151	D7M116	D2M161	D6M118	D7M168	D8M188	D1M1103
573	ターゲッテドコミュニティジョン	B6.129P3-<i>Jap7</i>sup:tm1</sup></i>	a		c	ba		ca	b	ba		ab
574	ターゲッテドコミュニティジョン	129P3-<i>Jap3</i>sup:tm1</sup></i>		ba	<a		bc					
571	トランスジェニック	129P3-<i>Jap3</i>sup:tm1</sup></i>	ba	ba	ba			ca	b	ba	a	
559	ターゲッテドコミュニティジョン	B6.129S1-<i>Y1r</i>sup:tm1</sup></i>	a	a	b		bc					
572	ターゲッテドコミュニティジョン	B6.129P3-<i>Jap3</i>sup:tm1</sup></i>	ba	ba	ab			c				
557	ターゲッテドコミュニティジョン	B6.129S1-<i>Y1r</i>sup:tm1</sup></i>	ba	ba	ba			c	ab	ba		ab
558	ターゲッテドコミュニティジョン	B6.129S1-<i>Y1r</i>sup:tm1</sup></i>	a	a	a			ca	ab	ba		ab
568				ba				ca		ba	a	
569				ba				ca		ba	a	
570				ba				ca		ba	a	
544	近交系	B6-<i>Embs</i>sup:s</sup></i>	a	a	a		ba	a	b	b	b	b
530	ターゲッテドコミュニティジョン	B6.129-<i>Jap7</i>sup:tm1</sup></i>	ba	ba	ba			ca	b	ba	a	
472			ba	ba	b		ab					
564	ターゲッテドコミュニティジョン	129P3-<i>Jap3</i>sup:tm1</sup></i>	a		b<a		bc					
559	ターゲッテドコミュニティジョン	B6.129S1-<i>Y1r</i>sup:tm1</sup></i>	a	a	b	ab		c				
585				ba	ba			ca	ab	ba	a	
580				ba	ba			ca	b	ba	a	
581				b	ba		b	a	a	a	a	a
575	自然、近交系	B6J/c-<i>Jap7</i>sup:s</sup></i>	b	ba			b	a	a	a	a	a
592			ba	ba	ba			ca	b	ba	a	a
608			ab	a	ba			c				
582				ba	b		b	a	b	ba	b	b
583				ba	b		ba	a	a	a	a	b
579			a	a	a		b	ca	a	ab	a	b
388	トランスジェニック	B6J/c<i>Jap7</i>sup:tm1</sup></i>	b	ba	ba		ba	a	b	ba	ba	b
593			b	ab	ba			c				
622			ba	ba	ba			ca	b	ba	a	
533	ターゲッテドコミュニティジョン	129P3-<i>Jap3</i>sup:tm1</sup></i>	a	a	a		b	c	ba	b	b	b
371	近交系	A.62sup:Sk/sup	b	ba	ba		ba	a	b	ba	ba	b
375	近交系	A.62sup:Sk/sup	b	ba	ba		ba	a	b	ba	ba	b
474	トランスジェニック	B6-<i>Jap7</i>sup:tm1</sup></i>	ba	a	a		ca	a	b	ba	a	a

別表7 熊本大学 CARD に寄託されたマウス系統の遺伝子型タイピング結果 4

CARD ID	系統の種類	系統名	D7Mit416	D4Mit53	D6Mit15	D2Mit61	D5Mit18	D7Mit68	D8Mit88	D17Mit103
434	トランスジェニック	B6;129-<i>tg</i>(Acb-Mdr1a)376</i>	ba	ba	ba	ca	b	ba	a	
435	トランスジェニック	B6;129-<i>tg</i>(Acb-Ahr1b)</i>	ba	ba	ba	ca	b	ba	a	
437	トランスジェニック	C3H/HeJ-<i>tg</i>(MJA-BE10)</i>	a	ba	ba	a	a	b	b	b
332	トランスジェニック	C57BL/6-<i>hox</i>sup:ml</sup></i>	ba	ba	ba	ca	b	ba	a	
374	近交系	A.Cs12sup:Sk/sup	b	ba	ba	a	b	ba	b	
379	ターゲッテッドマウス	S1S.868-<i>Irf3</i>sup:ml</sup>Δ</sup></i>	a	a	a	c	b	ba	b	
369	ターゲッテッドマウス	129;129-<i>hprt</i>sup:ml</sup></i>	a	a	b					
418	ターゲッテッドマウス	B6;129-<i>Ssl1</i>sup:ml</sup>(GFP)luc</sup></i>	ba	ba	ba	ca	b	ba	a	
415			ab	ba	ab	c				
417	ターゲッテッドマウス	B6;129-<i>Ssl1</i>sup:ml</sup>(GFP)luc</sup>Ssl1</sup>Δ</sup>ml</sup>luc</sup></i>	ba	ba	ba	ca	b	ba	a	
443	トランスジェニック	C57BL/6-<i>tg</i>(Lck-Flt3L-Flax)</i>	ba	a	a	ca	b	ba	a	
420			b	b	b	c				
413	ターゲッテッドマウス	B6;129Sd-<i>hox</i>sup:ml</sup>(Cre)Soc</sup></i>	ba	ba	ba	ca	b	ba	a	
412	トランスジェニック	C57BL/6-<i>tg</i>(CM-cre)CMZ</i>	ba	ba	ba	ca	b	ba	a	
424	ターゲッテッドマウス	B6;129-<i>Mx1</i>sup:ml</sup></i>	ba	ba	ba	ca	b	ba	a	
383	近交系	A.Cs12sup:Sk/sup	b	ba	ba	a	b	ba	b	
405	ターゲッテッドマウス	B6;129Sv-<i>Irf2</i>sup:ml</sup>(farn1)sup:ml</sup></i>	ba	ba	ba	ca	b	ba	a	
450	ターゲッテッドマウス	B6;129-<i>Rnm1</i>sup:ml</sup>(Rnm1)Δ</sup></i>	ba	ba	ba	ca	b	ba	a	
359	ターゲッテッドマウス	B6;129-<i>Mdr1</i>sup:ml</sup></i>	ba	ba	ba	ca	b	ba	a	
479			ab	b	b	c				
447	ターゲッテッドマウス	B6;129-<i>Ptd</i>sup:ml</sup>(EPP)Δ</sup></i>	ba	ba	ba	ca	b	ba	ab	
376	近交系	A.Cs12sup:Sk/sup	b	ba	ba	a	b	ba	b	
427			ba	ba	a	a	a	ba	a	
451	トランスジェニック	B6;129-<i>tg</i>(Acb-Mdr1a)381</i>	ba	ba	ba	ca	b	ba	a	
421	トランスジェニック	C57BL/6Jcl-<i>tg</i>(CM-APR1109)/RES/EPP</i>	ba	ba	ba	ca	b	ba	a	
461			ba	ba	b	c				
422	トランスジェニック	C57BL/6Jcl-<i>tg</i>(CM-APR1100)/RES/EPP</i>	ba	ba	ba	ca	b	ba	a	
423	トランスジェニック	C57BL/6Jcl-<i>tg</i>(CM-APR1107)/RES/EPP</i>	ba	ba	ba	ca	b	ba	a	
400	トランスジェニック	C57BL/6-Tg(EF1-MRL1)2Jko	ba	ba	ba	ca	b	ba	a	
380	自然・人糞糞糞	C57-13/11bu	b	b	b	a	a	ba	a	
409	トランスジェニック	C57BL/6J-<i>tg</i>(E9300)393sk</i>	ba	ba	ba	ca	b	ba	a	

別表 8 熊本大学 CARD に寄れたマウス系統の遺伝子型タイピング結果 5

CARD ID	系統の種類	系統名	D4Mit146	D4Mit153	D8Mit15	D9Mit151	D17Mit16	D2Mit161	D5Mit18	D7Mit168	D8Mit88	D17Mit103
419			b	ab	bi	ab		c				
403	近交系	TS00.6-(1)2M1157-2M1192</>	b	ab	bi	ab		c				
414	ターゲットコミュニティ	86.129-(1)2a11(sup)mi1(ac2)mg</sup></>	b	ab	bi	ab	b	a	a	b	b	b
410	トランスジェニック	65JBL/6-(1)2g(EF200)216sk</>	bi	ab	bi	ab	b	a	b	ab	a	a
398	自然・人類発源	13101f(sup)</sup></>Pav6(sup)Ser-3H(sup)</sup></>	a				bi	a				
401	ターゲットコミュニティ	86.129Sv-(1)2Mas(sup)mi</sup></>	bi	ab	bi	ab		c				
415			ab	ab	ab	ab		c	ab	ab	a	a
403	近交系	TS00.6-(1)2M1157-2M1192</>	b	ab	bi	ab	b	a	a		b	b
425	ターゲットコミュニティ	86.129-(1)2a11(sup)mi2</sup></>	bi	ab	bi	ab		c	b		bi	bc
428	トランスジェニック	65JBL/6N-(1)2g(CAG-MPRA)WT/6end</>	bi	ab	bi	ab		c	b		bi	a
404	ターゲットコミュニティ	86.129Sv-(1)2f2(sup)mi</sup>P7r(sup)mi</sup></>	bi	ab	bi	ab		c	b		bi	a
319	ターゲットコミュニティ	86.129Sv-(1)2f5(sup)miS18</sup></>	bi	ab	bi	ab		c	b		bi	a
407	ターゲットコミュニティ	86.129P2-(1)2ApoE(sup)mi1nc</sup>P1r(sup)miSaw</sup></>	bi	ab	bi	ab		c	b		bi	a
420	トランスジェニック	65JBL/6N-(1)2g(CAG-MPRA)KD/6end</>	bi	ab	bi	ab		c	b		bi	a
426	ターゲットコミュニティ	86.129-(1)2a11(sup)mi2</sup></>	bi	ab	bi	ab		c				
402			a		bi	ab	a					
397	ターゲットコミュニティ	86.129Sv-(1)2a11(sup)mi</sup></>	ab	a	b	ab	b	c				
549	ターゲットコミュニティ	86.129-(1)2a11(sup)mi</sup></>	bi	ab	bi	ab		c	b		bi	a
550	ターゲットコミュニティ	86.129-(1)2a51(sup)mi</sup></>	bi	ab	bi	ab		c	b		bi	a
551			ab	ab	bi	ab		c				
552			bi	ab	ab	ab		c				
548	トランスジェニック	65JBL/6-(1)2g(Lck-Egr)4K</>	bi	ab	bi	ab		c	b		bi	a
557	ターゲットコミュニティ	86.129Sv-(1)2f6(sup)mi</sup></>	bi	ab	bi	ab		c	a		bi	b
415	トランスジェニック	86-(1)2g(Medb-Avpr1a)5</>	bi	ab	bi	ab		c	a		bi	a
510			b	ab	bi	ab		c				
511			ab	ab	ab	ab		c				
512			a	ab	bi	ab		c				
513			ab	ab	ab	ab		c				
515	トランスジェニック	10R_129-(1)2g(pA)GGS-β	ab	ab	ab	ab	b	ac				
532	ターゲットコミュニティ	02_129-(1)2fmi1(sup)mi</sup></>	a	a			b		bi		bi	b
540	ターゲットコミュニティ	86.129-(1)2fmi3(sup)mi</sup></>	bi	ab	bi	ab		c	a		bi	a
495	ジャントラブ	86.129-(1)2fmi3(sup)mi1(Ay12)1961mg</sup></>	bi	ab	bi	ab		c	a		bi	a
565			bi	ab	bi	ab		c	a		bi	a
533	ターゲットコミュニティ	02_129-(1)2fmi2(sup)mi</sup></>	a	a	a		b	bi	bi		bi	b

中性子線発生用加速器システム (NASBEE) を用いた
in vitro 生物研究のための試料照射方法及び実験環境の整備

小西 輝昭*¹、須田 充¹、萩原 拓也^{1,2}、酢屋 徳啓¹、児玉 久美子^{1,2}、
前田 武¹、高野 裕之^{1,3}、濱野 毅¹、今関 等⁴

1) 研究基盤技術部 放射線発生装置利用技術開発課 2) (株) ネオス・テック
3) 東京ニュークリア・サービス (株) 4) 研究基盤技術部

Received 10 June 2008

概要

当課が所掌する放射線発生装置は、中期計画において研究活動に関連するサービスとして施設及び設備の共用化を推進が求められている。生物影響実験用中性子加速器システム (NASBEE) もこの方向に沿って共用施設としての整備を進めている。中性子生物影響研究における哺乳類細胞などの in vitro 研究のための NASBEE のニーズも予想されることから、その照射実験及びその環境整備を進める必要があった。そこで、中性子照射後に問題となる放射化生物試料の処理環境の整備を開始した。中性子線照射は、細胞試料中培養液の放射化が激しいことなどから、その培養液の漏れ等による汚染を防ぐ必要があり、細胞照射容器及び照射方法の検討、照射後に放射化した培養液等の処理環境の検討および整備について安全課と相談のもと検討を進め、中性子照射実験プロトコールの第一案を作成した。さらにこのプロトコールに従い、予備的な生物実験を行ったので報告する。

Keywords: 中性子線、2MeV、in vitro、哺乳類細胞、RBE

***Corresponding Author:**

小西 輝昭 (Teruaki Konishi)

e:mail tkonishi@nirs.go.jp

1. 序論

1999年のJCO臨界事故を背景に、低エネルギー中性子線の生物効果に関心が寄せられている。しかし、2 MeV程度の中性子線で生物照射実験を行える大強度中性子照射場の実現は容易ではなく、世界的に見ても少ない。そこで、2003年度に、中性子線生物影響研究を目的として中性子線発生用加速器システム (Neutron Accelerator System for Biological Effect Experiment; NASBEE) が導入され、様々な技術開発研究が進められている[1-3]。NASBEEの加速器本体・施設については、同巻号にて別途報告する[3]。このNASBEEには、マウス・ラットなどのin vivo研究のための照射実験を行うことが可能なSPF (Specific Pathogen Free) 照射室と加速器制御にかかわる動作確認、照射条件設定などの基礎的な物理測定を行うための生物・物理照射室の二部屋が整備されている。SPF照射室における照射方法及びマウス放射化に伴う管理区域外への持ち出し基準については、以前に報告した[1]。そして、哺乳類細胞などの培養細胞を用いたin vitro研究も行える照射環境及び実験環境が望まれている。そこで、物理・生物照射室における細胞照射ためのプロトコールを作成することから開始した。中性線照射には、他の電離放射線源に比べて、著しく放射化を引き起こす。特に、細胞培養に用いるような培養液では、その組成に必須であるNa、Cl、などの元素の放射化が著しい。そのため、照射試料の処理環境についても安全かつ実験に支障をきたさない方法を検討した。

さらに、このプロトコールの実用性を検証するために、予備実験として哺乳類細胞を用いて中性子線の細胞致死効果の測定を行った。

2. 照射のための細胞試料容器と照射方法について

中性子照射実験プロトコール(案)を以下に示す。このプロトコールを原案として進め、所内の

研究者の方々にもご協力していただき、案の改訂を進めている段階である。

<中性子照射実験プロトコール(案)>

照射後における細胞試料の管理区域内外への搬入・搬出に関して：

A. 照射後の手順：

A-1. 試料は、搬出用運搬箱(鉛遮蔽された箱)に入れる。

A-2. NASBEE照射室側室から搬出する際はGM計数管で測定し、表面線量が130cps以下であることを確認し、搬出物品汚染検査記録に記入してから搬出する。

A-3. 細胞処理、運搬箱からの試料の取り出し及び細胞処理はすべてRI棟1F生物4室で行う。

A-4. RI棟への試料の搬入の際は、必ず、照射物(照射試料)として搬入届を記入する。

A-5. 細胞培養液は、極低汚染溶液として流しに流してもよい。

B. 実験後または継続処理のための細胞試料のRI棟からの搬出は、必ず汚染検査をしてから搬出物品汚染検査記録に記入してから搬出する。(17時までは安全課(又はTNS)の担当者が行うが、17時以降は実験者で行う。時間外作業を行う場合は、届出をする。)

C. 細胞試料の作成条件について：

C-1. 細胞試料の照射容器としては、T25細胞培養フラスコ(FALCON)を使用し、ボトルフラスコ内の培養液量は、5ml以内とする。

D. 照射条件について：

現在、in vivo(マウスなど)での照射実験を開始しており、可能な限りそれと同等の照射条件にて細胞照射実験も進めていく。

D-1. 照射野：直径20 cm (STD: 1170cm) →(T25ボトルフラスコ 合計6個)

D-2. 線量率：約2 Gy/hr

D-3. 最小線量：0.05 Gy, 最大線量：2.0 Gy

D-4. 試料交換のための照射室立ち入り回数：4回/日、（ただし、1 Gyは3回/日まで）

3. 照射後の細胞処理環境について

照射後の試料の処理は、すべて共同実験施設である RI 棟一階の生物4室にて行うことを原則とした。そのため、所内・所外ユーザーが使用できる実験を整備している。

安全キャビネット(1台)、インキュベータ(大1台、小3台)、冷蔵庫(1台)、細胞観察用顕微鏡(1台)、恒温槽(1台)などの基本的な細胞培養設備は使用可能である。現在、設置・整備してある装置の詳細は、表1にリストとして示した。

表1. NASBEE 細胞培養室 (RI 棟 生物4室) 内研究用備品

備品名	型番
安全キャビネット	MHE-130AB3, SANYO
CO ₂ incubator (大)	F370, Thermo Electron Corporation
CO ₂ incubator (小) ×3台	BNS-110, ESPEC
恒温水槽	EX Thermo minder, TAITEC
細胞観察用顕微鏡	CKX31, OLYMPUS
細胞濃度計数装置	Coulter counter Z1
冷蔵・冷凍庫	MEDICOOL, MPR-214



図1. RI 棟生物4室内の様子。設置してある備品については、表1. に記した。

4. 培養細胞を用いた予備実験

まずは、前述した中性子照射実験プロトコール(案)の運用を目的とした細胞実験を行った。細胞試料としては、V79 (Chinese Hamster, fibroblast, lung) を用い、照射の24時間前に 5.0×10^5 個の細胞を T25 ボトルフラスコに培養した。培養液には、Minimum Essential Medium Eagle 培地 (M4655, SIGMA) に抗生物質(500 unit/ml penicillin, 500 μ g/ml streptomycin sulfate) と 10%FBS を添加したものを使用した。中性子線照射には、NASBEE を用いた。中性子を発生させるためのターゲットには、厚み 0.5 mm の Be ターゲットを用いた。このターゲットと試料との距離 (STD) は 1170 cm で行い、このときの照射野 (直径 20 cm) における線量分布

の平坦度は±2.5%であるように調整した。[2] この照射条件において、T25 ボトルフラスコを一度に 6 個設置して照射でき、線量率は約 2 Gy/hr 程度であった。このターゲットを使用した場合に発生される中性子線の平均エネルギーは 2 MeV 程度ある。エネルギースペクトルの詳細については、現在測定・解析中である。

中性子線の細胞致死効果の RBE を算出するために、X 線照射を行った。X 線発生装置には、X 線棟第 3 照射室に設置してあった（現在は更新されて TITAN）PANTAK-320H を使用した。[4] 照射条件は、管電圧 200 kVp、管電流 20 mA とした。フィルターには、厚み 0.5 mm Cu と 0.5 mm Al のフィルターを用い、管球とサンプルとの距離（FSD）を 58 cm とした。このときの線量率は、0.9~1.0 Gy/min 程度であった。

表 2. 生存率曲線より算出した 10%生存率を示す線量 (D₁₀) と RBE

線種	X 線 (200 kVp)	中性子線 (2.2 MeV)
D ₁₀ (Gy)	7.4	1.9
RBE (D ₁₀)	1.0	3.9

照射後、10 cm シャーレに 200 個のコロニーが形成される見積もりで細胞数を計算して播き、8 日間通常の培養条件化でコロニー形成を行った。その後、10%ホルマリンで細胞を固定後メチレンブルーにて染色し、コロニー数を計数し、各線量における生存率を算出した。

中性子線と X 線照射によって得られた生存率曲線を図 1 に示した。Linear-Quadratic (LQ) モデルを用いてフィッティングして得られた近似曲線を実線で示した。この LQ モデルのパラメータである α 、 β とこのパラメータをもとに算出した生存率 10%になる線量 (D₁₀)、中性子線の D₁₀ より求められる Relative Biological Effect

(RBE)を表 2 に示した。RBE が 3.9 という値が得られた。

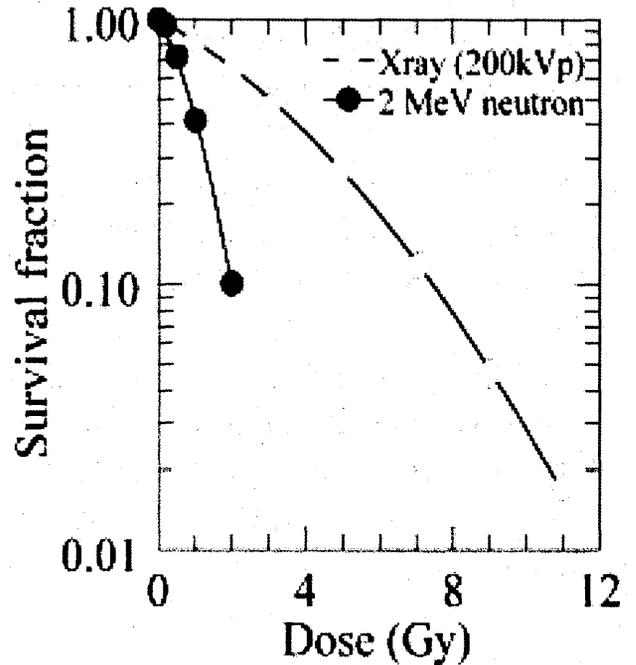


図 1. 中性線と X 線の生存率曲線を示した。●は中性子線照射、○は X 線照射による生存率曲線。

5. まとめ

NASBEE を用いた *in vitro* 実験施設の整備について報告した。さらに今回の予備実験では、以前 RARRAF (米) [5, 6]や HIRAC (日本) [7] などで行われた低エネルギー中性子線照射実験の結果とほぼ同様の結果を示すことができた。このことから、現在の照射プロトコル、照射・細胞処理環境ともに実験可能な環境が整備できたと考えている。

今後は、新規所内・所外ユーザーの開拓を行うとともに、実験系の多様化に対応するために、安全面を重視しながら、今回示した<中性子線照射実験プロトコル (案)>をもとに改訂を進めていこうと考えている。

引用文献

- [1] 萩原拓也、須田充、酢屋徳啓、小西輝昭、濱野毅、宮原信幸、高田真志、大町康、平岡武、今関等、マウス放射化実験結果報告、放射線医学総合研究所技術報告書 (*NIRS Technology*)、**1** (2007)14-19
- [2] 酢屋徳啓、須田充、萩原拓也、中性子照射用加速器のメンテナンス状況、放射線医学総合研究所技術報告書 (*NIRS Technology*)、**1**(2007) 20-23
- [3] 須田充、他、放射線医学総合研究所技術報告書 (*NIRS Technology*)、**2**(2008) this issue.
- [4] 三井大輔、石川剛弘、磯浩之、酢屋徳啓、今関等、放射線医学総合研究所技術報告書 (*NIRS Technology*)、**1**(2007) 43-47
- [5] E.J. Hall, J.K. Novark, A. M. Kellerer, H. H. Rossi, S. Marino, and L. Goodman, *Radiat. Res.*, **64**(1975) 245-255
- [6] R.C. Miller, S. A. Marino, S.G. Martin, K. Komatsu, C. R. Geard, D. J. Brenner, E. J. Hall, *J. Radiat. Res.*, **40**(1999) 53-59
- [7] N. Kubota, S. Okada, S. Nagamoto, F. Ozawa, T. Inada, C. D. Hill, S. Endo, K. Komatsu, *J. Radiat. Res.*, **40**(1999) 21-27

放射線医学総合研究所のヒューマン・カウンタ

前田 武*¹、高野 裕之²

- 1) 基盤技術センター研究基盤技術部
- 2) 東京ニュークリア・サービス株式会社

Received 10 June 2008

要旨

以前放医研のヒューマン・カウンタについて紹介した[1]。本報告書ではその内容を整理・補足し、改めて報告する。

ヒューマン・カウンタは、人体内に含まれる放射性物質の測定を行う装置であり、ホールボディ・カウンタとも呼ばれる全身計測測定装置である。この装置を使うことで、体内被ばくを算出することが出来、バイオアッセイ法と並んで内部被ばくを知る上で重要な位置を占めている。

ヒューマン・カウンタを構成する部材は非常にバック・グラウンドが低い鉄材等を使用し、検出器にはφ8 inch、厚さ4 inchのNaI(Tl)に4本の光電子増倍管を取り付けたディテクタが1組とGe半導体検出器が取り付けられており、高い分解能を有している。これらについて紹介すると共に、体内放射性物質がどれだけ体内にあるかを算出する方法にも簡単に触れ紹介する。

Keywords: ヒューマン・カウンタ、ホールボディ・カウンタ、全身測定装置、低バック・グラウンド測定装置、共同実験機器

**Corresponding Author:*

前田 武 (Takeshi Maeda)

e:mail : ta_maeda@nirs.go.jp

1. 序論

ヒューマン・カウンタは非常に低いバック・グラウンド(自然計数)を達成するために、第1研究棟地階に設置されている。その非常に低いバック・グラウンド環境下で人体に含まれる放射性核種の量とその空間的、時間的变化を測定することを目的とした装置である。この装置は、 γ 線を放出する体内に取り込まれた放射性物質を測定するため、NaI(Tl)検出器[2][5]とGe半導体検出器[5]を備えている。

主な用途としては、体内に含まれた ^{40}K や ^{137}Cs の測定、体内に残されているトロトラストの分布調査、肺に残留する放射性物質の測定、及び不慮の放射性核種体内摂取者についての緊急対応測定がある。

実際に、1986年に起こったチェルノブイリ原子力発電所の事故時にも用いられ、その後継続して環境中に放出された放射性物質による被ばくに調査[2][7]に用いられている。本報告書ではNaI(Tl)検出器及び測定等について報告する。

2. ヒューマン・カウンタの仕様

2.1 構造

放射線医学総合研究所のヒューマン・カウンタ(Whole Body Counter: 全身放射能計測装置)[3]は外部からの放射線の影響を極力排除して非常に低いバック・グラウンドを得、かつ測定精度を上げるために、宇宙放射線の影響の少ない第1研究棟の地階に設置されている。

ヒューマン・カウンタを構成する鉄室の材料は第2次世界大戦前の鉄などを使用している。これらには、溶鉱炉壁面の劣化を調べるための ^{60}Co が溶け込んでおらず、素材の持つ放射能が低いとされているためである。

また、外部からの放射線に対する遮蔽能力及び強度等を十分検査された素材を用いている。

材質を表1に、各寸法を表2に示す。また、外観を図1、図2に示した。

表1 鉄室の材質

遮蔽壁	鋳鉄 JIS 1種1号C
鉛板	厚3[mm]電気鉛(99.99%)
内張材	銅板:厚0.1mm 電気銅 アクリル樹脂板:厚2mm 内面塗装材:白色ビニールペイント
外張材	鋼板/厚4mm

表2 鉄室のサイズ

大鉄室	内寸法: 2,610(D)×1,710(W)× 1,860 mm (H) 遮蔽壁厚: 200 mm 仕切壁厚: 100 mm
小鉄室	内寸法: 2,260(D)×910(W)× 1,580 mm (H) 遮蔽壁厚: 150 mm
重量	66 ton

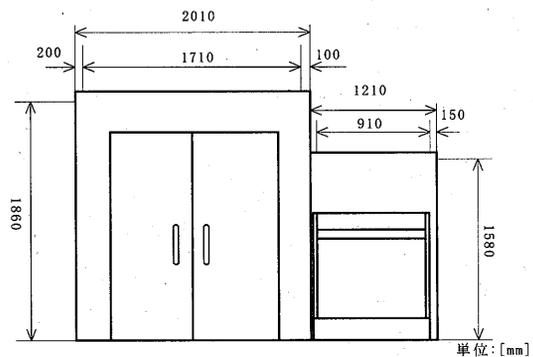


図1 ヒューマン・カウンタの正面。二つの鉄室から構成されており、使用されている部材はそれ自身のバック・グラウンドが低い第2次世界大戦前のものが使用されている。

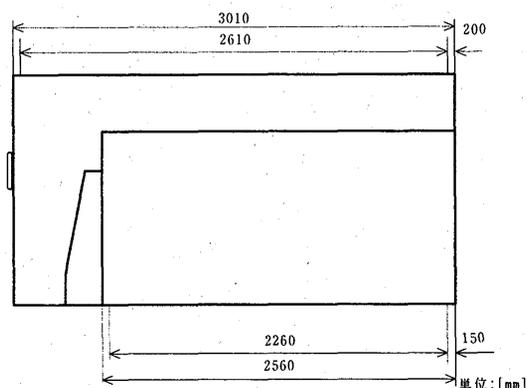


図2 ヒューマン・カウンタの側面。大きな鉄室では、被測定者を測定し、小さな鉄室には Ge 半導体検出器を冷却するため、液体窒素自動冷却装置が設置されている。

鉄室は広さが限定された室内に据付けることを考慮し、鉄室本体を多数の鑄鉄製平板ブロックに分割、測定に悪影響を及ぼすと思われる溶接はできるだけ避け、外部からの放射線の入射を防ぐために開孔部は迷路構造とし、迷路構造にできない部分にはシールド・ブロックを取り付けている。更に、全ての継手部は段付継手によるボルト締め構造で組み立て外部を仕上げたものである。

鉄室内は、様々な測定が可能のように NaI (TI) 検出器移動装置、Ge 半導体検出器、ベッド等が配置されている。各装置は鉄室内を広く利用できるように出来る限りコンパクトにまとめ、操作を容易にして安全に運用できるように考慮してある。

2.2 空気調和装置

鉄室の心臓部である検出器は湿気や気温の変化に弱いため、鉄室及び鉄室設置室内は恒温恒湿に保ち、室内にラドン・トロンが堆積しないよう換気を行い、常に同等な条件で測定できるよう配慮している。また、外部から埃等の進入を防ぐため、設置室用の恒温装置は2段のフィルタを、鉄室内用の恒温装置は4段のフィルタを噛まし、鉄室内用には中性能フィルタ及び高

性能フィルタを用いて防塵に配慮している。フィルタ性能を表3に示す。

表3 フィルタ性能

プレ・フィルタ	補修効率：65%以上 寸法：594×594× 293 mm
中性能フィルタ	補修効率：90%以上 寸法：594×594× 293 mm
高性能フィルタ	補修効率：99.97%以上 寸法：610×610× 292 mm

空気調和装置から送り出される空気は、風量約 1 m³/min、フィルタ・ボックスを経て鉄室内に送られる風量は約 0.5 m³/min である。

2.3 NaI(Tl)検出器

検出器はある測定時間内に光電子増倍管(フォトマル) [3][4][5]に感知されたγ線を計数して放射線の量を測定する。図3にヒューマン・カウンタで使用されている光電子増倍管の外観図を示した。

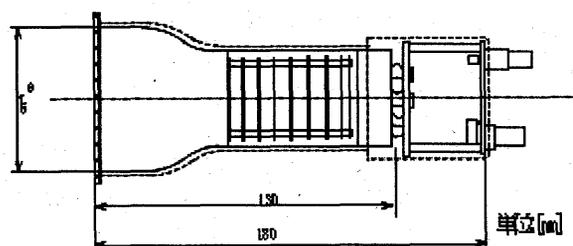


図3 光電子増倍管の模式図。左側の窓から微弱的な放射線を感知し、電気信号に変換した後、中央にあるフィンで電気信号を増幅し右側のコネクタから出力する。

ヒューマン・カウンタの場合では、被験者から放出されたγ線が光電子増倍管によって感知され、それが電気信号として増幅された後、制

御 PC で処理されグラフとして表示される。測定回路のブロック図を図 4 に示した。

この出力された結果である γ 線スペクトルから体内にどのくらいの放射性物質が存在するか計算により求めることが出来る。

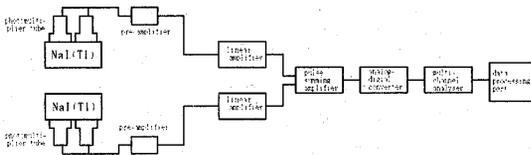


図 4 測定回路のブロック図。NaI(Tl)検出器で検出された放射線を電気信号に変換・増幅し、上下の検出器からの信号を合算しアナログ信号をデジタル信号に変換し、データ処理する。

NaI(Tl)検出器[4]のディテクタの外観を図 5 に示す。このディテクタは、Harshow / FILTROL 社製 32MBS16 / 3B-X(特殊型 32MBS16 型)を使用し、使用チューブベースには、ローバックチューブベースを使用し、信号用コネクタには BNC、高圧用コネクタには SHV を使用してノイズの混入が少なく優れた信号対雑音比が得られるように工夫している。

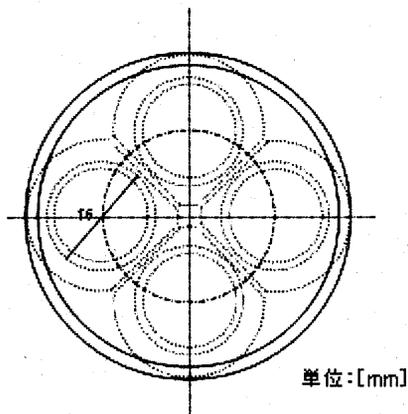


図 5 $\phi 8$ inch、厚さ 4 inch の NaI(Tl) 結晶と 4 本の光電子増倍管を取り付け合計信号が ^{137}Cs 測定時に 8.5%以下の高い分解能が得られている。

また、特殊型 32MBS16 型ディテクタには $\phi 8$ inch、厚さ 4 inch の NaI(Tl)結晶に光電子増倍管 4 本を取り付け、それらの合計信号が ^{137}Cs 測定時に 8.5%以下の高い分解能が得られるよう設計されている。規格を表 4 に示す。

また、ディテクタは移動式であり、その移動速度は 5 cm/min、10 cm/min、20 cm/min の 3 段階調整が可能で最大移動距離は 186 cm となっている。速度が遅ければ遅いほど体内放射性物質の測定を正確に出来ることから通常は 5 cm/min で使用するが、測定目的[7]によっては速い速度でおこなうなど使い分ける。

表 4 特殊型 32MBS16 型規格

NaI(Tl)	$\phi 8$ inch / 厚さ 4 inch
NaI ブロック	$\phi 8$ inch / 厚さ 3 inch
光電子増倍管	RCA4900
ハウジング	ステンレス・スチール

3. 体内放射性物質量の算出法

先に述べたが、出力された結果である γ 線スペクトルから体内にどのくらいの放射性物質が存在するか計算により求めることが出来るので、放射能の算出に必要な諸パターンや計算式及び測定誤差について示した。

3.1 検出効率 ϵ の算出法

検出効率 ϵ は、単位放射能・単位時間当たり放出された放射線に対する検出器に感知された放射線数の比であるので、①式で求められる。

$$\epsilon = \frac{S}{n_0 P t} \times 100[\%] \dots \textcircled{1}$$

S: 着目している γ 線の正味計数値(カウント)

P: γ 線放出比(%)

t: 定時間(sec)

n_0 : 壊変率(dps)

γ線放出比は、放射性核種の物理データ[6]表5より求める。

表5 放射性核種物理データ

核種	半減期	エネルギー (keV)	γ線放出比(%)
⁴⁰ K	1.277×10 ⁹ y	1461	10.7
¹³⁷ Cs	30.04 y	662	85.1
¹³⁴ Cs	2.065 y	605	97.6
		796	85.5
		569	15.4
²³¹ Th	25.52 h	25.6	14.5

$$(a-Y/2):x=(a-b)(f-e)$$

$$\Leftrightarrow x=\{(a-Y/2)(f-e)\}/(a-b)$$

$$f-x=D \dots \textcircled{4}$$

同様にして、c,dについて考える。

$$(c-Y/2):x'=(a-b)(h-g)$$

$$\Leftrightarrow x'=\{(c-Y/2)(h-g)\}/(c-d)$$

$$g-x'=G \dots \textcircled{5}$$

よって、半値幅 FWHM=G-D となる。

3.2 計数効率ηの算出法

計数効率η[8]は、崩壊率に対する計数率の比であるから②式で求められる。

$$\eta = \frac{a}{A} [cpm / Bq] \dots \textcircled{2}$$

a: 着目しているγ線の定量域における正味計数率(cpm)

A: ファントム中の放射能(Bq)

3.3 エネルギー分解能

エネルギー分解能 R は光電ピークの半値幅(FWHM)[3][5]の相対値であらわせるので③式で求めることができる。

$$\text{分解能 } R = \frac{FWHM}{H} \times 100 (\%) \dots \textcircled{3}$$

H: ピーク値

半値幅とは、光電ピークの最大計数率の1/2の点での光電ピーク幅のことである。

図6にグラフモデルを示す。この様なピークがあったときの半値幅を求めるには、以下の通りである。

左辺の a,b について考える。

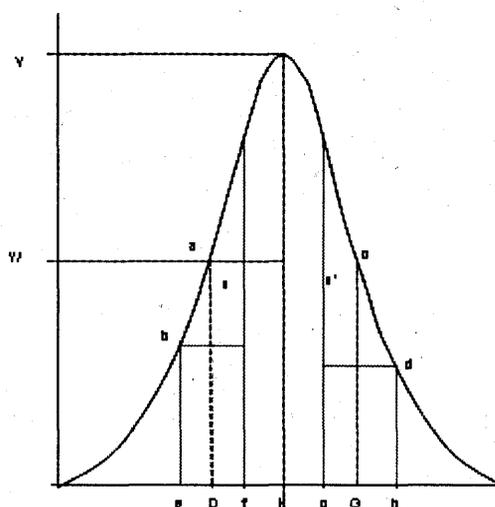


図6 検出されたピークから半値幅を求める G-D

3.4 検出限界の求め方

測定で得られた計数率が意味のある値であるためには、測定試料の正味の計数率 n_s が正味計数率の誤差 σ_s より十分大きくなくてはならない。即ち、Kσ_sφn_s の場合である。ここで、分布が正規分布になる程度まで長時間十分に計測時間をかけたとき、バック・グラウンドの変動の3倍よりも大きくなれば(K=3)99.7%の確率で有意性があると言える。2倍より大きければ(K=2)95%の確率である。

正味計数率の誤差 σ_s は、バック・グラウンドを含めた前計数率の誤差 σ_c と、バック・グラウンド計数率の誤差 σ_b から⑥式のようになる。

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_G^2 + \sigma_b^2} = \sqrt{\frac{n_G}{t_G} + \frac{n_b}{t_b}} \dots \textcircled{6}$$

n_G :バック・グラウンドを含めた測定試料の全計数率 ($n_G = n_s + n_b$)
 n_b :バック・グラウンドの計数率
 t_G :測定試料の計数時間
 t_b :バック・グラウンドの計数時間

これより検出限界[8]を与える計数率 n_s^{\min} は

$$K \sqrt{\frac{n_s^{\min} + n_b}{t_G} + \frac{n_b}{t_b}} = n_s^{\min}$$

$$(n_s^{\min})^2 - \frac{K^2}{t_G} n_s^{\min} - K^2 n_b \left(\frac{1}{t_G} + \frac{1}{t_b} \right) = 0 \dots \textcircled{7}$$

⑦式を解くと

$$n_s^{\min} = \frac{1}{2} \left[\frac{K^2}{t_G} + \sqrt{\left(\frac{K^2}{t_G} \right)^2 + 4K^2 n_b \left(\frac{1}{t_G} + \frac{1}{t_b} \right)} \right]$$

$$= \frac{K}{2} \left[\frac{K}{t_G} + \sqrt{\left(\frac{K}{t_G} \right)^2 + 4n_b \left(\frac{1}{t_G} + \frac{1}{t_b} \right)} \right] \dots \textcircled{8}$$

となり⑧式で与えられる。また、検出限界の放射能はこの計数率と計数効率を用いて求めることができる。

3.5 ^{137}Cs と ^{40}K の計数効率算出法

^{137}Cs の計数効率 η_c

$$\gamma_c = \frac{c_c - c_w}{n_0} \text{ [cps/Bq]} \dots \textcircled{9}$$

c_c : ^{137}Cs Phantom の ^{137}Cs 領域
 c_w : Water Phantom の ^{137}Cs 領域
 n_0 : Phantom 中 ^{137}Cs 放射能[Bq]

^{40}K の計数効率 η_k

$$\gamma_k = \frac{k_k - k_w}{n_0} \text{ [cps/Bq]} \dots \textcircled{10}$$

k_k : ^{40}K Phantom の ^{40}K 領域
 k_w : Water Phantom の ^{40}K 領域
 n_0 : Phantom 中の ^{40}K 放射能[Bq]

4. 人体に取り込んだ放射性物質の定量

前項で、人体内放射性物質の算出について述べた。ここまでで人体内放射性物質の量を出ることが出来る。しかし、人体内には平常時でも放射性物質が含まれているため、算出された量全てが事故等で体内に蓄積された放射性物質の量と言うことにはならない。そのため、基準となるファントムを用いて定量をし、どのくらいの量が体内に蓄積されたかを知る必要がある。

4.1 全身に存在する ^{137}Cs と、 ^{40}K の定量

(ストリップング法の適用例)

添字 S, C, K, W は、被検者、 ^{137}Cs ファントム、カリウム、水ファントムを示し、regions Cs, K はそれぞれ ^{137}Cs と、 ^{40}K との定量エネルギー領域を示す。

各計数率をまとめると表6の様になる。

表6 記号一覧

	被験者	W	K	^{137}Cs
region Cs	C_s	C_w	C_k	C_c
region K	K_s	K_w	K_k	K_c

region Cs での ^{137}Cs の計数効率を η_c 、region K での ^{40}K の計数効率を η_k とすると、

4.1.1 被検者のカリウム量、 S_k

$$S_k = \frac{k_s - k_w}{\eta_k} \text{ [g]} \dots \textcircled{11}$$

η_k は既知量 (重量) のカリウム (塩化カリウム) 水溶液を封入したファントム (カリウム-ファントム) を計測して得られる。

$$\eta_k = \frac{k_k - k_w}{M_k} \dots \textcircled{12}$$

M_k : K Phantom 中の K の質量

4.1.2 region Csにおけるピーク面積に占める全身に存在する⁴⁰Kのγ線に起因する寄与面積の推定。

ファントムの計測結果が、被検者にも適用可能と仮定すると、Kが存在するとき、⁴⁰Kのコンプトン散乱である region Csにおける⁴⁰Kの寄与面積 S

$$S = \frac{c_K - c_W}{k_K - k_W} \times (k_S - k_W) \quad \dots \textcircled{13}$$

β被検者の¹³⁷Cs量 S_{cs}は、region Csの正味面積から S を差し引いて得られる。

$$S_{cs} = \frac{(c_S - c_W) - S}{\eta_C} \quad [Bq] \quad \dots \textcircled{14}$$

η_cは既知量(放射能)の¹³⁷Cs水溶液を封入したファントム(¹³⁷Csファントム)を計測して得られる¹³⁷Csの計数効率である。

4.2 全身に存在する⁴⁰Kから受ける年間被ばく線量(MIRD法[9])

$$D = \frac{Q}{W} \left\{ Br + a \times Wr \times \left(\frac{W}{1000} \right)^b \right\} \times 24 \times 265 \quad \dots \textcircled{15}$$

D: μGy

Q: ⁴⁰K存在量 [Bq]

Br: β線による放射能線量換算係数

$$2.8946 \times 10^{-1} \left[\frac{g \cdot \lambda Gy}{Bq \cdot h} \right]$$

Wr: 体重 70[Kg]のICRP標準人のγ線による放射能線量換算係数

$$2.7567 \times 10^{-2} \left[\frac{g \cdot \lambda Gy}{Bq \cdot h} \right]$$

$a \times \left(\frac{W}{1000} \right)^b$: γ線の組織吸収率の体

格差補正項

a, b: γ線の組織吸収率の体格差補正係数

W: 体重[g]

カリウムの1gには⁴⁰Kが30.97 Bq含まれる。Qをカリウムのグラム数としてM、体重Wをgで表すと、

$$D = \frac{M}{W} \left\{ 2.8946 \times 10^{-1} + a \times 2.7567 \times 10^{-2} \times \left(\frac{W}{1000} \right)^b \right\} \times 24 \times 265 \quad \dots \textcircled{16}$$

W ≥ 50000[g]で、a = 0.359、b = 0.241である。

4.3 全身に存在する¹³⁷Csから受ける年間内部被曝線量(MIRD法[9])

Q[Bq]が年間を通じて体内に存在すると仮定すると、

$$D = \frac{Q}{W} \times \left\{ 1.4638 \times 10^{-1} \times 1.0681 \times 10^{-1} \times \frac{W}{70000} \times 12.968 \times \left(\frac{W}{1000} \right)^{-0.603} \right\} \times 24 \times 365 \quad \dots \textcircled{17}$$

Q: [Bq]

D: [μGy/year]

W: [g]

と表せる。

図7に実際の測定データを示す。

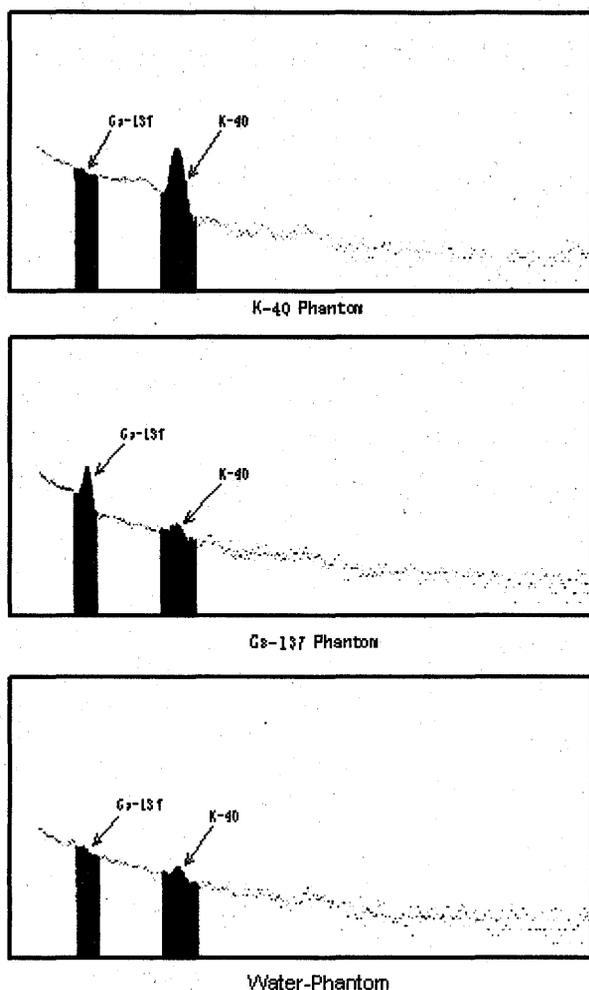


図-7 ファントム測定の結果。黒い部分が ^{137}Cs と ^{40}K の領域を示したROI

5. まとめ

ヒューマン・カウンタで測定する体内放射性物質は、通常環境では測定がしにくく低いバック・グラウンドを要求されるものである。そのため、最小検知放射能を小さく測定する必要があるが、そのためには①計数時間を長くとり、②検出効率を大きくする、③バック・グラウンド計数効率を小さくする、の3通りの方法がある。これは、理想的な状態について考えているので、実際のバック・グラウンド計数率の変動は単純に計数の統計的性質だけから必ずしも記述できるものではない。上記の方法の中で特に力を入れるべき方法は③で、遮蔽などでバック・グラウンド計数率が低くなるように配慮する。

バック・グラウンド計数率の原因は大別して以下の3種類に分けることが出来る。

①周囲物質からの放射線、②宇宙線によるもの、③電氣的ノイズ、放電による偽計数などである。これらの対処方法は原因によって異なる。まず、①では、鉄や鉛などの遮蔽材によって計数管の遮蔽を行う事である。 γ 線計数を例に取ってみると、10 cmの鉛で検出器を取り込んだ場合、1 MeV近辺の領域では自然計数は約1/100に激減する。もし、5 cmの鉛で取り囲んだ場合軽減は1/10程度にとどまるので低バック・グラウンドの遮蔽体の厚さは10 cmが目安と思われる。同様に鉄を用いた場合には、20 cmの厚みが必要になる。ただし、遮蔽材などにも微量ながら放射能を含んでいるので、自然計数の原因となることもある。②の場合、硬成分は通常遮蔽で取り除くことは困難である。極力避けたい場合には測定室を地下に作るなどの工夫が必要である。また③の場合には、高電圧印加部にテフロンを用いたり、除湿に心がけたりするとよい。また、他の装置のスイッチ、リレー、サイリスタ等からのノイズが電源を介して進入するので注意する。

自然計数(自然バック・グラウンド Natural background)を減らせば短い時間で精度の高い測定が可能になる。したがって微量の放射能も比較的容易に測定できるようになる。

先に述べたとおり、自然計数を減少させる方法の一つに、遮蔽材を設けて自然放射線を遮蔽させる方法がある。ヒューマン・カウンタの鉄室の場合、鉄厚が20 cmなので計数値の値が1/100以下に減少することになる。

現在、ヒューマン・カウンタには今回紹介したNaI(Tl)検出器に加え、Ge半導体検出器が新たに付加されNaI(Tl)では難しい体内放射性物質の測定が行えるようになった。Ge半導体検出器を用いた測定については、別の機会を紹介する。

謝 辞

1995年の原稿執筆時に多くのアドバイスをいただいた、内山正史氏(元環境衛生研究部長)、石川徹夫氏(放射線防護研究センター環境放射線影響研究グループ)、松本雅紀氏(緊急被ばく医療研究センター被ばく線量評価部)に感謝いたします。

引用文献

- [1] 前田 武、*放射線科学*, **38**(1995) 456-462.
- [2] M. Uchiyama, T. Ishikawa, *J. Radiat. Res.*, **40**, (1999) 359-360.
- [3] 山田 勝彦、*放射線計測技術*、通商産業研社(2005) p 97-100, p127、p135-136.
- [4] 野口 正安、富永 洋、*放射線応用計測*、日刊工業新聞、2004、154-169.
- [5] ニコラス・ツルファニディス、阪井 英次、*放射線計測の理論と演習(上巻)*、現代工学社 1986、42、206-226
- [6] 社団法人日本アイソトープ協会、*アイソトープ手帳*、社団法人日本アイソトープ協会、2001、p23, p52, p 72
- [7] M. Uchiyama, Y. Nakamura, S. Kobayashi, *Health Phys.*, **71**(1996) 320-325.
- [8] (財)日本原子力安全技術センター、*被ばく線量の測定・評価マニュアル*、(財)日本原子力安全技術センター、2000、34-36
- [9] I. Anzai, *Jan.J.Radiol.Technol.*, **36**(1980) 209-225

マウスにおける黄色ブドウ球菌 *Staphylococcus aureus* の

同定検査法の改良

石田 有香*¹、小久保 年章¹、入谷 理一郎^{1,2}、舘野 香里^{1,2}、
早尾 辰雄¹、西川 哲¹

- 1) 基盤技術センター 研究基盤技術部 実験動物開発・管理課、
- 2) 株式会社 サイエンス・サービス

Received 16 June 2008

要旨

ブドウ球菌属 *Staphylococci* に分類される菌の多くはヒトや動物の常在菌であるにもかかわらず、場合によっては病原性を示す。とりわけ、黄色ブドウ球菌 *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) はブドウ球菌属菌の中でも病原性が強いとされている。本来、日和見病原体である黄色ブドウ球菌は感染していても発病することは極めて稀だが、緑膿菌同様、免疫不全動物や放射線照射をした動物等では重篤な症状を示すことがある。一方で、黄色ブドウ球菌は SPF 施設においても散発的に検出される可能性があり、感染を最小限に抑えるためにも簡便・迅速で正確な同定が要求される。

そこで、黄色ブドウ球菌分離培地（エッグヨーク食塩寒天培地）に発育した黄色ブドウ球菌類似の集落、すなわち黄色ブドウ球菌擬陽性を示す細菌を用いて、従来より迅速な同定検査法について検討した。

Keywords: 黄色ブドウ球菌、同定、マンニット分解性、卵黄反応、分離培地、嫌気培養、PCR、*nuc* 遺伝子

***Corresponding Author:**

石田 有香 (Yuka Ishida)

e:mail ishida@nirs.go.jp

はじめに

現在の実験動物施設では、微生物学的な品質管理が広く行われている。飼育施設の整備や、飼育装置の開発・実用化も進み、また実験動物使用者の利用意識も向上したことにより、実験動物に致命的な病原体の汚染率は激減した。しかしその一方で、通常は病原性を示さない日和見病原体については依然として高い汚染率を示している。

本来、日和見病原体は感染していても発病することは極めて稀だが、緑膿菌同様、免疫不全動物や放射線照射をした動物等では重篤な症状を示すことがあり、放医研でも日和見病原体には常にある。また、長期飼育実験の実施や、一室の動物飼育室を複数のユーザーで使用している現状から、飼育室を定期的に、あるいは実験終了毎に洗浄することも困難であり、日和見病原体の拡散リスクは高くなっていると考えられる。

そのような中で近年、放医研の施設やブリーダーでも黄色ブドウ球菌 *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*)に感染したマウスが確認されるようになった。黄色ブドウ球菌はブドウ球菌属菌の中でも病原性が強いとされており、感染を最小限に抑えるためにも簡便・迅速で正確な同定が要求される。

そこで、分離培地（卵黄添加マンニット食塩寒天培地）に発育した黄色ブドウ球菌と黄色ブドウ球菌に類似の集落（黄色ブドウ球菌擬陽性）を形成するグラム染色陽性球菌を用い、各菌間の性状の違いを利用して黄色ブドウ球菌における従来より迅速な検査法を検討した。

方法

1. 細菌の同定

① C3H/HeNrs マウスあるいはBALB/cA-nu/nu マウスから得た新鮮便の蒸留水懸濁液、または盲腸内容物を試料とし、黄色ブドウ球菌分離培地（エッグヨーク食塩寒天培地（栄研化学））へ接種した。

② 試料を接種した分離培地は37°Cで48時間培養を行った。

③ 分離培地上でマンニット分解性を示し、白濁環（卵黄反応陽性）が見られた集落について48時間の純培養を行った後、黄色ブドウ球菌の従来の同定試験 i) グラム染色、ii) ラテックス凝集試験（PS ラテックス‘栄研’（栄研化学））を行った。

④ さらに、グラム陽性菌同定キット（BD BBLCRYSTAL GP 同定検査試薬（日本ベクトン・ディッキンソン））を用いて、細菌の同定を行った。

2. 同定検査法の検討

① 上記③の集落を釣菌し、黄色ブドウ球菌分離培地（エッグヨーク食塩寒天培地（栄研化学））に接種し、37°Cの嫌気的条件下で24時間、48時間の培養を行った。

② ③と同様の集落を釣菌して生理食塩水に溶菌し、黄色ブドウ球菌検出用のプライマーとして *nuc* 遺伝子、細菌全てが保有するプライマーとして16S rDNA を使用して、PCR法を行った。その後、電気泳動により増幅産物を調べた。

結果

1. 分離培地上に発育した集落

好気的条件下で48時間培養した結果、マンニット分解性があるため培地が黄色に変化し、白濁環も観察される集落が3種確認された（図1）。



図1 分離培地上に発育した集落。（左、中）分離培地に生育した黄色ブドウ球菌の集落。

（右）分離培地に生育した黄色ブドウ球菌に類似の集落。好気的条件下でマンニット分解性を持ち、卵黄反応による白濁環も確認できる。

2. グラム染色とラテックス凝集試験

グラム染色の結果、全ての細菌がグラム陽性球菌を示した。形態からは3種の細菌を区別することはできなかった(図2)。また、ラテックス凝集試験による凝集反応についても全ての細菌で確認された。

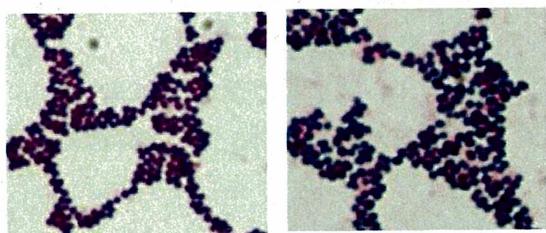


図2 グラム染色像。黄色ブドウ球菌とそれ以外の細菌を区別することはできない。

3. 細菌の同定

純培養後の3種の集落を用いて、ブドウ球菌陽性細菌用同定キットによる細菌の同定を行った。その結果、好氣的条件でマンニット分解性を示し、卵黄反応による白濁環が確認できた3種の細菌は、それぞれ *Staphylococcus aureus*、*S. intermedius* ならびに *S. xylosus* と同定された。

4. 分離培地を用いた嫌氣的条件下での培養

黄色ブドウ球菌分離培地に発育した黄色ブドウ球菌と黄色ブドウ球菌に類似の2種の集落について、再び分離培地へ接種し、嫌氣的条件下で培養を行った結果、培養24時間後では黄色ブドウ球菌 *S. aureus* では培地が黄変しマンニット分解性が確認されたが、*S. intermedius* では培地の色に変化は見られなかった。

また、培養48時間後では黄色ブドウ球菌 *S. aureus* に卵黄反応が認められたのに対し、*S. xylosus* では認められなかった。

5. PCR法による増幅産物

細菌の全てが保有している16S rDNAのプライマーを使用した増幅産物は黄色ブドウ球

菌以外でも確認されたが、黄色ブドウ球菌に特有のプライマーとして使用した *nuc* 遺伝子の増幅産物は黄色ブドウ球菌のみで確認された(図3)。

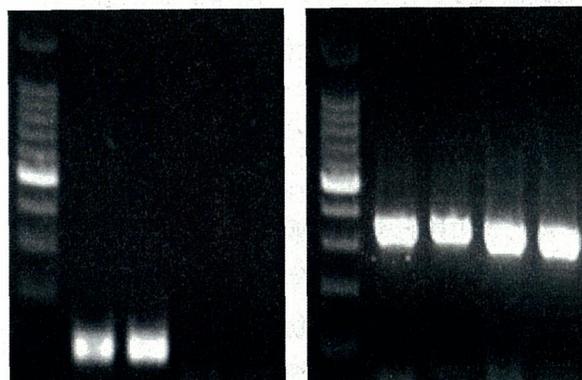


図3 PCR法による増幅産物。(右) *nuc* 遺伝子に特異的なプライマー、(左) 細菌全てが保有する16S rDNAのプライマー。M, 100bp DNA ladder Marker; 1, 2, 黄色ブドウ球菌 *S. aureus*; 3, 4, 分離培地上で黄色ブドウ球菌擬陽性を示した細菌。

まとめ

動物施設を管理する上で、検出された細菌の同定を迅速に行うことは重要である。マウスの糞便や盲腸内容物を黄色ブドウ球菌分離培地で培養すると、黄色ブドウ球菌に類似の集落が発育する場合があります。今回我々は、分離培地に発育した類似の2種の集落について検討を行った。それらの細菌が黄色ブドウ球菌ではないことを確認するという方法で、動物施設での黄色ブドウ球菌に対する適切な対処、対応ができると考えた。

糞便や盲腸内容物から検出された細菌について、純培養後の集落を用いて行ったグラム染色およびラテックス凝集反応では3種の細菌は同様の結果を示したが、同定キットを用いることで、それぞれ異なる細菌であることが分かった。しかし、この方法では純培養に要する48時間とその後の生化学的試験や同定キットによる培養(18時間)等の時間が必要であり、黄色ブドウ球菌の感染・拡散を最小限に抑えるための迅速で最良の方法とは言

い難い。

しかし、今回検討した2つの方法 1. 生化学的性状の違いを利用した分離培地の嫌気培養、2. 黄色ブドウ球菌に特有のプライマーを使用した PCR、を組み合わせることにより、*S. intermedius* ならびに *S. xylosus* が黄色ブドウ球菌 *S. aureus* ではないことを迅速かつ正確に確認することができた。

黄色ブドウ球菌の分離培地（卵黄添加マンニット食塩寒天培地）に接種した細菌を嫌気的条件下で培養することによりマンニット分解性あるいは卵黄反応の有無を調べること、ならびに黄色ブドウ球菌が産生する核酸分解酵素 nuclease（100℃、1時間の加熱に耐性）をコードする *nuc* 遺伝子の有無を調べることで黄色ブドウ球菌とそれ以外の2種の細菌を区別できることが分かった。これにより、判定までに必要とする時間を従来の同定法より短縮することができた。

この改良方法は、日和見病原体の一つである黄色ブドウ球菌の拡散リスクを最小限に抑えるために有効であると考えられる。

今後は、判定までに要する時間をさらに短縮するため、糞便から直接嫌気培養や PCR 法を行っても正確な判定ができるよう、検査方法を改良していく予定である。

参考文献

- [1]Odd G. Brakstad, et al. *Detection of Staphylococcus aureus by Polymerase Chain Reaction Amplification of the nuc Gene. J. Clini. Microbiol.*,**30** (1992)1654-1660.
- [2]T. Hosoi, *Rapid Detection of Staphylococcus aureus in Natto Using Real-time PCR*, 東京都立食品技術センター研究報告、第 14 号 (2005)6-10.
- [3]衛生試験法・注解 2005 (2005)85-86.
- [4]重茂克彦、モダンメディア 54 巻 4 号(2008) 131-134.

X 線棟標準線源室における線量率の空間分布

海老澤 悟¹、北村 尚^{*1}、石川 剛弘¹、今関 等¹、
酢屋 徳啓¹、高野 裕之²、三井 大輔³

1) 放医研 研究基盤技術部 2) (株)東京ニュークリアサービス 3) (株)ネオス・テック

Received 16 June 2008

要旨

放医研の X 線棟の標準線源室では、ガンマ線に対する検出器の校正試験だけではなく、低線量率での生物試実験が行われている。目的にあった線量率の場を決めるためにスタンド型ガンマ線照射装置の ^{137}Cs を用いて標準線源室の各場所での線量率測定を行った。照射室内の位置、および、鉛板を吸収体として使用することで、 ^{137}Cs 線源で、約 0.05~100 mGy/hour の線量率での照射が可能である。

Keywords: X 線棟、標準線源室、スタンド型ガンマ線照射装置、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、空気等価型電離箱

***Corresponding Author:**

北村 尚 (Hisashi Kitamura)

e:mail kitamura@nirs.go.jp

1. Introduction

X線棟の標準線源室には、スタンド型ガンマ線照射装置で使用する ^{60}Co 及び ^{137}Cs ガンマ線源が設置されている。表1にこれらの線源の諸元をまとめた。標準線源室は、線量計の校正に使用されるだけでなく、生物実験にも使われており、低LET、低線量率の放射線場として利用されている。この様な実験のためには、線量率をコントロールする必要があり、線源と照射資料との間の距離とその間の物質を変えて線量率の変更を行っている。原理的にガンマ線源を用いた照射では線量や線量率は計算で導出することが可能であるが、実際には、線源や照射装置の状態によって値が変わる可能性があり、計算のみで線量を決めるのは困難である。さらに照射室内壁によるガンマ線の反射や、空気によるガンマ線の吸収の効果などを見積もる必要がある、実測データを用いて線量及び線量率を評価するほうが正確である。

本報告では、標準線源室内での測定方法について説明し、測定結果を示す。

表 1 スタンド型照射装置内の放射線源

	^{137}Cs	^{60}Co
納入日	1974年11月	1995年3月13日
納入時の放射能	3.7 TBq	1.85 TBq
半減期	30.23年	5.27年
2008年6月1日現在の放射能	1.75 TBq	0.37 TBq
典型的なガンマ線のエネルギー	0.662 MeV	1.173 MeV 1.333 MeV

2. 実験装置

2.1 スタンド型ガンマ線照射装置

図1はスタンド型ガンマ線照射装置の写真である。開口部は水平方向に向いている。その軸にそって垂直・水平方向にレーザーポイ

ンタが設置され、照射資料を置く基準としている。また、床面上にはこのビーム軸に平行にレールが敷設されて、レール上を照射台が移動できるようになっている。レールにはガンマ線装置と向かい合う壁を原点とする定規の目盛がふつてある。照射時にはこの定規を参考に照射位置を決定している。以下、本稿での位置の表示はこの定規の値を基準にしている。



図1 スタンド型ガンマ線照射装置。写真はガンマ線ビーム下流側から装置を撮った。写真下部の白色の場所が照射台で、その上にある黒色の球形のものが線量計である。また、照射装置の右側に置いてある鉛板(2.6mm厚)によって強度を落とした。

2.2 線量計

線量の測定には、Exradin社製のModel A6 Exradin Shonka-Wyckoff Spherical Chambersを用いた[1]。この電離箱は、空気カーマを測定するために、空気と等価の導電度を持つ導電性プラスチック(C552 Shonka Air-Equivalent Plastic)を用いて製作されている。ガスは雰囲気と等しく、形状は球形で当方的なレスポンスを持ち、外形が11.4cm、有効な容積が800ccと大型であることが特徴である(図1参照)。電離箱からの出力は、東洋メディック社製のRAMTEC1000で測定し、空気での線量として表示される。この系は、産総研にある ^{137}Cs

線源を用いて 22℃、1 気圧(atm)の条件で較正されているが、非密封型の電離箱であるため、内部の空気の物質質量に対する補正が必要である。測定時の気温 t (℃)と気圧 p (atm)によって、測定値 D_M から実際の線量 D にするには、

$$D = D_M \frac{(273.15 + t) 1}{(273.15 + 22) p} \quad (1)$$

とする。さらに、 ^{60}Co に対しては、ガンマ線の空気中でのエネルギー吸収比を乗じた。

表 2 線量率測定

実施日	線源	位置と条件
2003/3/13	^{137}Cs	9m
2003/3/19	^{137}Cs	8m
2003/3/20	^{137}Cs	7.5m
2003/3/27	^{137}Cs	3.5m
2003/3/28	^{137}Cs	5m 鉛 2.6mm
2003/4/8	^{137}Cs	8.5m 鉛 2.6mm
2003/4/8	^{60}Co	8.5m

3. 標準照射室内での測定

標準線源室内でのスタンド型ガンマ線照射装置の線量測定は、2003年2月から4月に行った。測定は、照射台を固定し、照射台上に置いた線量計をビーム軸に垂直かつ水平な方向に移動させてガンマ線ビームの横方向プロファイルを測定した。一連の横方向測定を照射台の位置を変えて繰り返し行い、線源と線量計の距離を変更し縦方向のプロファイルを測定した。また、より低い線量率での実験を行うために、照射装置の直近に鉛板を置き、同様のプロファイルの測定を行った。表2に測定日と線源、測定条件をまとめた。

各測定点では、1分間の線量を測定し、それを10回繰り返して、平均値を測定値、標準偏差を統計誤差とした。繰り返し測定の際は、

線量計を移動させていないので、位置精度に関する誤差は考慮していない。気温及び気圧は10回の線量測定前後に行い、それらの平均値を持って代表値として、(1)式から気温・気圧の補正を入れて、その点での1分間あたりの線量を求めて、その値に60(分)を乗じて、時間単位を「hour」とする線量率とした。

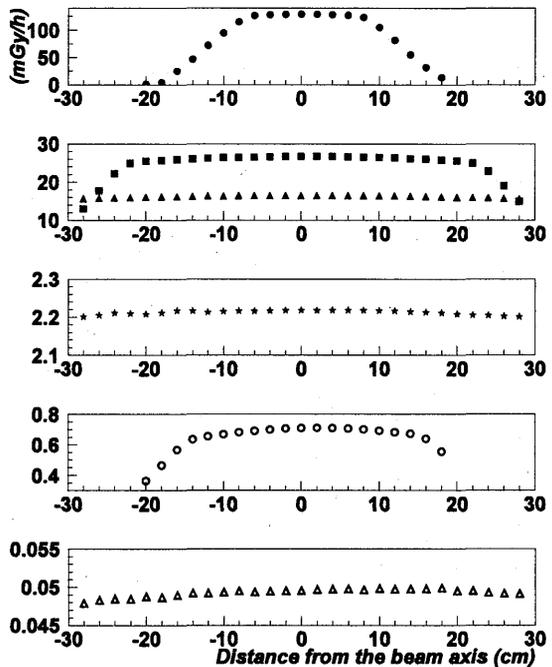


図 2 ^{137}Cs 線源の線量率測定の結果。横軸に、ビーム軸に垂直で水平な向きへのビーム軸からの距離をとっている。黒丸、黒四角、黒三角、黒星型はそれぞれ順に位置 9m、8m、7.5m、3.5mでの線量率を表している。中抜き丸と三角は吸収体として鉛を入れた場合で、場所はそれぞれ、8.5m と 5m である。

3.1 ^{137}Cs 線源

^{137}Cs 線源に対して測定した結果のグラフを図2に、また、数値を付表1にまとめた。照射位置としてあるのは、照射台のレールでの位置であり、線源からの距離ではないことに注意していただきたい。位置 9m から 8m では、線源からの距離が近いために、照射装置のシャッターによって影となるので、ビーム

軸から離れた場所では線量率が低下している。実際は、影の端部で線量率が急に落ちていると思われるが、線量計のサイズが直径 11cm あるので、そのために緩やかに落ちているように見えていると思われる。

図 3 は、ビーム軸上の測定点だけを抜き出し、横軸に位置、縦軸に線量率をプロットしたものである。線源を点とみなせば、線量率は線源と検出器の距離の二乗に反比例するので、線量率 D_{Fit} (mGy/h) は、照射台の位置 y (m) を用いて、

$$D_{Fit} = \frac{88.5}{(y - 9.83)^2} \quad (2)$$

と、記述すると、約 1%程度で測定した線量率を再現することが可能である。式(2)は、線源の距離のみの関数なので、照射台での横方向の位置 x (m) を考慮すると、以下の式のように記述できる。

$$D_{Fit} = \frac{88.5}{x^2 + (y - 9.83)^2} \quad (2)'$$

実際には、ガンマ線の空気による吸収や照射室壁での反射などの効果があるが、数%程度の誤差を今日できるならば、その影響を無視することが可能である。(2)'式は、測定日での線量率であり、現在の線量率 D (mGy/h) にするには、放射能の減衰を考慮する必要がある。Excel など で計算しやすいように、時間の単位を「1900年 1月0日を紀元とする『日』」とすると、測定日の代表値(2003年 3月 20日とする)は、37700 (day) となるので、ある時刻 t (day) での線量率は以下のようにあらわすことができる。

$$D = \frac{88.5}{x^2 + (y - 9.83)^2} 2^{-\frac{t-37700}{365.24 \times 30.07}} \quad (3)$$

また、より低い線量率での照射を行うために、厚さ 2.6mm の鉛板を吸収体として照射装置のシャッター前面に設置した場合の線量率分布の測定を行った。図 2 及び付表 1 からわかるよう

に鉛板によって 1/100 程度に線量率を抑えることが可能である。これらの測定では、ビーム軸の両側で線量率が数%程度非対称であることという結果になった。これらは、鉛板の不均一さや、設置時のたわみなどの原因が考えられる。特にたわみに関しては再現が困難であるので、ここでは測定値を示すにとどめておく。

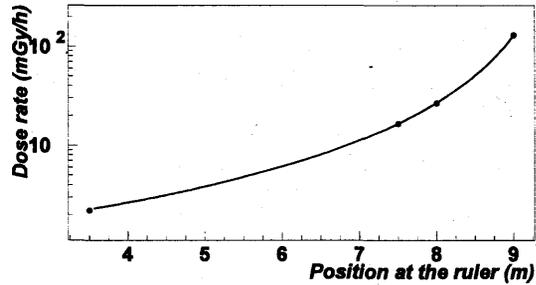


図 3 線源からの距離と線量率の相関。横軸は実際の線源からの距離ではなく、照射台のレールのスケールの値である。Fitting 関数は(2)式参照。

3.2 ^{60}Co 線源

^{60}Co 線源に関しては、照射台位置が 8.5m での横方向の広がり測定を行った。図 4 が結果である。Cs 線源と同様に、シャッターの影響で、両端には照射されない部分が出てくるが ±15cm 程度で照射が可能であることがわかる。

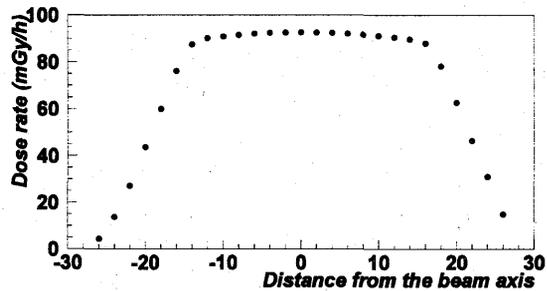


図 4 ^{60}Co 線源に対する線量率測定。照射台位置が 8.5m で、横軸にビーム軸に垂直で水平な方向。

4. まとめ

エックス線棟の標準線源室にあるスタンド型照射装置にある、 ^{60}Co ガンマ線源と ^{137}Cs ガンマ線源での照射の際の、照射室内での線量率分の測定を行った。 ^{137}Cs 線源による照射では、照射室内での位置と吸収体としての鉛板を用いることで、0.05~100 mGy/hour の線量率で照射が可能である。吸収体を使用しない場合は、線量率が線源からの距離の二乗に反比例するという単純なモデルを適応すれば、数%程度で測定値を再現できる。

時間変化に関しては、線源が単純に減衰している場合を仮定しているが、照射装置の機械的な問題によって装置内部での線源の位置が変化し、線量率が変化してしまう可能性がある。そのため、今後実験を開始する際には、今回のデータをそのまま使用せずに線量の測定を行うべきである。しかし、照射室内での相対的な線量率としては、十分使用可能であろう。

終りに

本稿は、故海老澤悟氏が生前に測定された貴重なデータを元に作成した。そのため、首著者として氏の名前を挙げ、所属を当時の部署名からそれに対応する現在の部署名に変更させていただいた。

参考文献

- [1] R. Minniti and S.M. Seltzer, *Applied Radiation and Isotopes*, **65**(4) (2007) 40

付表 1 137Cs 線源での線量率の空間分布 (表中の単位は mGy/h)

水平方向(cm)	位置 9m (2003/3/13)		位置 8m (2003/3/19)		位置 7.5m (2003/3/20)		位置 3.5m (2003/3/27)		位置 8.5m、鉛 (2003/3/28)		位置 5m、鉛 (2003/4/8)	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
-28			13.00427	0.0081181	15.676338	0.0032753	2.2011435	0.0008436			0.0479002	0.000147
-26			17.789051	0.0062126	15.803539	0.0033741	2.2053393	0.0011982			0.048292	0.0001449
-24			22.158335	0.0070939	15.899199	0.0049381	2.210901	0.001528			0.0484772	0.0001261
-22			24.94135	0.0066287	15.973995	0.0033425	2.2092594	0.0013712			0.0484412	0.0002279
-20	1.3096766	0.0089844	25.500428	0.0041299	16.065105	0.0035281	2.207473	0.0012426	0.3636228	0.0005591	0.0487673	0.0001827
-18	4.2788396	0.005126	25.702466	0.0045361	16.131222	0.0036209	2.2109491	0.0013618	0.4650131	0.0003109	0.0486385	0.0002144
-16	25.187605	0.0076684	25.847207	0.0056459	16.208891	0.0030414	2.2168531	0.0010886	0.5659489	0.0003563	0.0489484	0.0002135
-14	46.264501	0.0120472	26.071139	0.0075937	16.244007	0.0020223	2.2159405	0.001205	0.6336926	0.000376	0.0492241	0.0002141
-12	72.176925	0.012089	26.229628	0.0057275	16.343534	0.003913	2.212969	0.0008785	0.6547189	0.0003607	0.0492228	0.0002115
-10	94.779736	0.0098598	26.386524	0.009051	16.30372	0.0052432	2.2147343	0.0013149	0.6690701	0.0004817	0.0493574	0.0002714
-8	115.42254	0.0255923	26.483617	0.0085671	16.425048	0.0022766	2.2160142	0.0010852	0.6818832	0.0005546	0.0494928	0.0001211
-6	126.56308	0.0141717	26.520714	0.009352	16.461502	0.0034745	2.2156252	0.0010249	0.6911662	0.0005447	0.049387	0.0002715
-4	127.84774	0.0193622	26.606653	0.0079461	16.476722	0.0032091	2.2167837	0.0009698	0.6991232	0.0007377	0.04945	0.0002171
-2	128.60341	0.0147697	26.66998	0.0058614	16.494347	0.0024869	2.2179248	0.0013507	0.7050834	0.000462	0.0495079	0.0002003
0	128.9085	0.0173575	26.674441	0.008227	16.496268	0.0042544	2.218226	0.0012152	0.7084003	0.0007032	0.0495585	0.0002384
2	129.01331	0.0132757	26.701012	0.0063878	16.489956	0.0044247	2.2176533	0.0008027	0.7099966	0.0004746	0.0496977	0.0001533
4	128.28075	0.0095507	26.671513	0.0057979	16.46909	0.0034479	2.2181636	0.0017755	0.7089806	0.0005528	0.0497328	0.0001755
6	127.17015	0.012424	26.608863	0.0075813	16.455929	0.0047821	2.2179829	0.0008333	0.7057614	0.0007141	0.0497953	0.0002345
8	123.22693	0.0139232	26.523145	0.0083465	16.440352	0.0039728	2.2176182	0.0012473	0.6997633	0.0003224	0.0496083	0.0001064
10	104.93931	0.0143957	26.425684	0.0075432	16.365607	0.0046502	2.2171724	0.0009142	0.6928488	0.0007519	0.0498075	0.0002815
12	81.376238	0.0154894	26.304464	0.0092052	16.33393	0.0041365	2.2162446	0.0012842	0.6827349	0.0005658	0.0497276	0.0002249
14	55.184311	0.0101959	26.125518	0.0077895	16.275161	0.0048955	2.2139849	0.0013663	0.6710199	0.0004144	0.0497507	0.0001855
16	31.785694	0.0109634	26.002817	0.0073781	16.183182	0.004969	2.2127274	0.000709	0.6395054	0.0006494	0.0497768	0.0002845
18	13.554086	0.0090697	25.779556	0.0045537	16.122502	0.0038083	2.2106562	0.0013106	0.5549163	0.0002576	0.0498442	0.000265
20			25.54085	0.0043768	16.039693	0.0033598	2.2074364	0.0008117			0.0494803	0.0002135
22			24.955172	0.0057512	15.941295	0.003063	2.205087	0.0011526			0.0495296	0.0001608
24			22.861694	0.00598	15.856188	0.0032387	2.2050238	0.0009886			0.04927	0.0003447
26			19.068731	0.0094295	15.738113	0.0058309	2.2023468	0.0011225			0.049172	0.0001406
28			14.95648	0.0088654	15.534332	0.0056011	2.2016893	0.0010779			0.0490944	0.0002055

速中性子照射用加速器システム (NASBEE)

須田 充*¹、萩原 拓也²、酢屋 徳啓¹、濱野 毅¹、高田 真志³、
小西 輝昭¹、今関 等⁴

- 1) 基盤技術センター研究基盤技術部放射線発生装置利用技術開発課
- 2) (株)ネオステック
- 3) 基盤技術センター研究基盤技術部放射線計測技術開発課
- 4) 基盤技術センター研究基盤技術部

Received 30 June 2008

要旨

放射線医学総合研究所では、0.5～2 MeV 程度の速中性子線の生物影響を調べるために低線量影響実験棟を建設し、その中に、特に低線量中性子線の個体への影響を明らかにするために、衛生的に管理された Specific Pathogen Free (SPF) の条件下で小型動物（マウスやラットなど）を照射できる速中性子照射用加速器システム (NASBEE) を平成 15 年度に導入した。このシステムは静電加速器を使用した中性子線照射装置で加速器にはインラインタンDEM静電加速器を使用し、大電流を生成可能なマルチカスプイオン源を装備している。本年度、4 MeV、最大 0.6 mA の重水素をベリリウム金属にあて、速中性子線（最大 7.5 Gy/hr）を発生できるシステムを構築した。これにより、従来行えなかった制御されたエネルギー（0.5～2 MeV）や γ 線の混入が少ない中性子線の生物影響実験が可能となった。

Keywords: 加速器、中性子、タンDEM型静電加速器、SPF、

***Corresponding Author:**

須田 充 (Mitsuru Suda)

e-mail: suda@nirs.go.jp

1. 序論

中性子線は低 LET 放射線と比べ生物影響が強く、その効果にはエネルギー依存性があると考えられている。茨城県東海村で 1999 年 9 月に発生した株式会社ジェー・シー・オーによる臨界事故 (JCO 事故) を契機に中性子線の生物影響研究に関して強い関心をもたられるようになった。JCO 事故で放出された放射線の中で中性子線の占める割合が高く、そのエネルギーは 10 MeV 以下で 2 MeV にピークを持つスペクトルであったと考えられている [1-3]。2 MeV 以下の中性子線の生物影響は大きいと考えられているが個体レベルでの中性子線の影響に関するデータでは人におけるリスクの直接算定に利用可能な疫学集団はなく中性子線の影響評価において動物実験が重要とされる。現在は中性子線のエネルギーと生物学的効果比の関係が不明な点が多く発がんリスク推定や放射線防護基準へ反映されていない。放医研では JCO 事故におけるデータをもとに 10 MeV および 2 MeV 以下の中性子線の生物影響に関する研究を開始した。速中性子照射用加速器システム (NASBEE) は 2 MeV 以下の中性子線の生物影響を研究するための 2000 年に計画・建設された。現在は発がんや胎児影響に関する研究がおこなわれている。

2. NASBEE の構成

2.1. 加速器

加速器本体にはインライントンデム静電加速器 (B5812, オランダ HVEE 社製) を採用した [4]。従来のシェンケル昇圧回路方式のトンデム型加速器では、高電圧 (昇電圧) の部分が加速管と 90 度の角度で接するようになっているので、加速器本体の外観は、英文字の T に似ていて、設置スペースを大きく取らなければならなかった。インライントンデム静電加速器は、昇圧部を加速管と同軸に配置してあるため、概観は、葉巻状で、従来の T

シェイプより、少ないスペースで設置することができる。シェンケル回路方式のトンデム型加速器の特徴は、コッククロフトウォルトンタイプと比較して、コンデンサを取り除いて小型化を図った点にある。また、大きな静電エネルギーを蓄えないから、バンデグラーフ型と同じく、放電が起こった時に他の加速器内部部品を痛めることが少ないとか、出力電圧を検出して発信器の B 電圧を制御すれば良いから、発生電圧の安定化が楽である等の長所を持っている。放医研のインライントンデム加速器は、高圧タンクの大きさは、高さ約 2 m、全長約 4 m で、絶縁ガスには、SF₆ を使用している。ターミナル電圧は最大 2 MV で最大電圧時のリップル (さざ波の意。交流電圧から直流電圧に変換する際に、直流電圧に重畳する交流成分。小さければ小さいほど加速エネルギー安定度が高い) 電圧は 385 V_{pp} 電圧安定度は 300 V_{pp} である。絶縁ガスの露点は常に -60°C に維持・管理していることもあってか、ターミナル電圧は大きな放電を起こすことなく 2 MV まで短時間で昇圧することが可能である。表 1 に加速器のスペックを示す。図 1 に加速器、ビームライン及び照射室の側面図を示す。イオン源には大出力の小型マルチカスプ型イオン源を採用している [4]。現在までに運転実績のあるエネルギー及び最大ビーム電流はターゲット上で重水素では 4 MeV で 500 μ A、2 MeV で 100 μ A、水素では 4 MeV で 800 μ A である。表 2 に加速可能な核子、エネルギー、ビーム強度 (μ A) を示す。ビームサイズはターゲットの位置に石英ガラスを設置し、ビームが当たった際に発光する光を観察して直径が約 10 mm であることを確認している。

2.2. 中性子発生部

加速器により加速されたイオンはビームポートの終端に設置されたターゲットに照射さ

れ核反応により中性子を発生させる。NASBEEは加速電流が大強度であるため、ターゲット上を位置固定ビームで照射するとターゲットを熱破損してしまう。この対策として重粒子線治療にも用いられているワブラー電磁石を利用し、ターゲット上で直径100mmの円を描くようにビームを偏向回転させることによって、加速電流によるターゲット上の熱が一箇所に蓄積しないようにしている。NASBEEではメインのターゲットに純度90%の金属Beを用いており、d-Beとp-Be反応によって中性子を発生させる。またLiターゲットを開発中で、p-Li反応によるエネルギー幅の狭い中性子発生も予定している。現在主として実験で使用しているターゲットを図2に示す。3mm厚のBeを18mm厚のCuにロウ付けしたもので、Cu面を水で冷却している。冷却水の層は25mmである。ターゲットの交換は比較的容易に行えるように、冷却水の配管はフレキシブルチューブを採用している。

ターゲットはターゲットシールド内に設置した。ターゲットシールドの構造は図3で示すように鉄とポリエチレンで構成した。ター

ゲットシールドはターゲットの放射化による照射室内の線量レベルの上昇や照射試料への γ 線の影響を抑える役目を持っている。また、ターゲットより発生した中性子をコリメートすることで部屋内に散乱する中性子線を減少させる効果を持たせた。照射時にはターゲット直下の γ 線シャッターが開き中性子を照射し中性子の照射が終わると γ 線シャッターが閉まりターゲットから照射試料への γ 線の影響を抑えるようにした。現時点で、1日の総照射線量が中性子発生用ターゲット（中性子発生源）から試料までの距離（STD：Source Target Distance）1170mmにおいて約11Gyだと、照射室内の線量が入室可能なレベルまで低下するのにおよそ1時間半以上かかる。この間にも照射試料にはターゲットから放出される γ 線が照射されることになるので、特に低線量率の放射線生物影響実験を行う場合では、このような余分な放射線（ γ 線）の影響は避けるべきであり、 γ 線シャッターは照射試料へのこの γ 線の線量寄与を低減させる目的で取り付けられた。また照射室に立ち入る際に作業者の被曝線量の低減にもなっている。

表1 加速器スペック

	実測値	スペック
加速器形状	インラインタンデム型静電加速器	
昇圧方式	コッククロフト・ウォルトン	
最大ターミナル電圧	2.0 MV	
ターミナル電圧安定度	300 V _{p-p}	400V _{p-p}
ターミナル電圧リップル	385 V _{p-p}	規定無
SF6の露点	-60 °C	-40 °C
ビームサイズ(中性子生成ターゲット上)	10 mm	

表2 加速エネルギーと最大ビーム電流

核種	加速エネルギー (MeV)	ビーム強度* (μ A)
水素	3.0 - 4.0	800
重水素	1.5 - 3.0	100
	3.0 - 4.0	500

*中性子生成ターゲット上

インラインタンデム型静電加速器

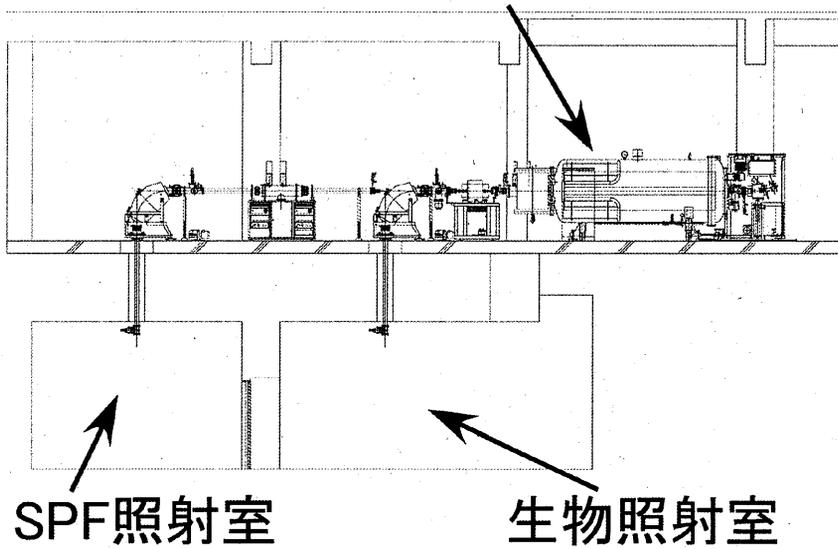


図1 加速器及び照射室側面図

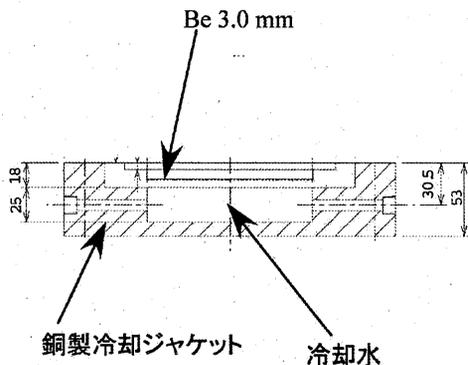
2.3. 照射室

NASBEE システムは図2に示すように2つの照射室を持っている。照射室の1つは SPF に管理されたエリアに設定され *in vivo* の実験を行っている。もう1つの照射室はコンベンショナルエリアに設定され *in vitro* や物理測定等に使用している。細胞実験の際は、培養液や細胞容器などが放射化してしまうため RI 棟生物4室に細胞実験用の実験室を整備し照射後の細胞処理を安全に行えるようにしている[5]。両照射室の構成物は同一であり、実験結果を双方の実験へ反映させることを容易に行える。

図2 中性子生成ターゲット断面図

2.4. 中性子線の線量

NASBEE の線量測定は図4に示した電離線量計(図4 IC-17A, Far West Technology)を使用し、電荷の読み取りには 6517A, KEITHLEY、高圧電源は 556H, ORTEC を使用している。線量計は所内第3研究棟地階コバルト照射室において ^{60}Co 線源にて校正を行った物を使用した。STD1170 mm の位置で重水素 4MeV400 μA 時の中性子線量率は約 2.2 Gy/hr である。この条件で線量率分布を取得した際の $\pm 2.5\%$ 線量率平坦領域の大きさは、直径が約 240 mm である。高線量率が必要となる実験では STD 710 mm で照射を行っている。このときの条件は、ビーム電流 400 μA で線量率を約 7.5 Gy/hr まで増加させることができる。しかし $\pm 2.5\%$ 線量率平坦領域の直径は約 120 mm にまで減少してしまう。



照射場における提供線量の安定性は、各測定日の平均線量率を 100%としてこれを基準とすると、測定値の一日の安定性は図5で示

すように $\pm 0.25\%$ と良好な値を示している。長期間での線量率安定性については図6に示す。半年間の全測定値の平均を100%とした場合、安定性は $\pm 1\%$ 以内になる。長期間での変動の原因としては線量計自体の誤差とビーム調整による誤差の累積だと考えられる。

現在、生物照射や細胞照射のためのビーム提供時には、試料照射前に毎回線量測定を行い照射日当日の“線量/モニタ値”を算出してユーザーに提供している。また、短時間で線量率分布中心の確認を行うことができるツールを開発中であり、運用まではまだ時間を要するために、毎回線量分布を手動で計測してユーザーに試料の設置位置を提示している。

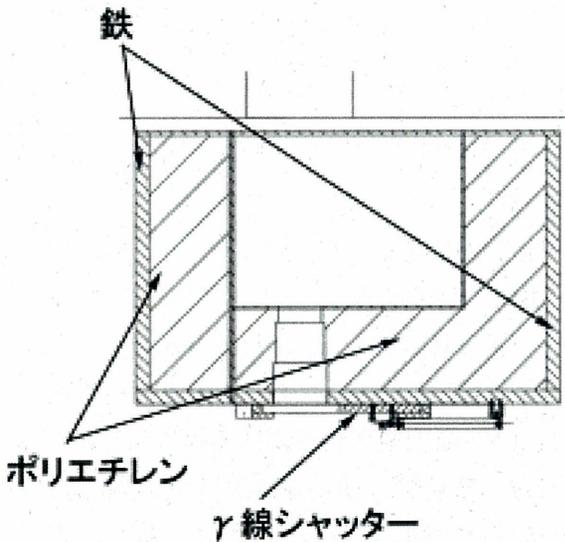


図3. ターゲットシールド構造図

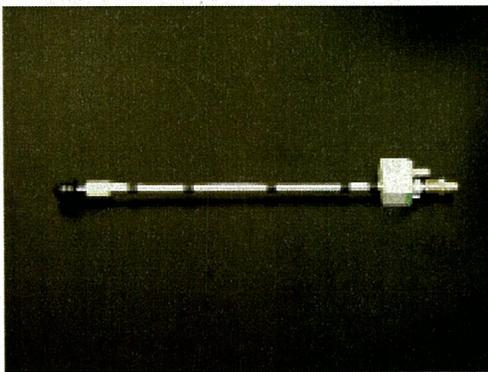


図4. 線量測定に用いているIC-17A

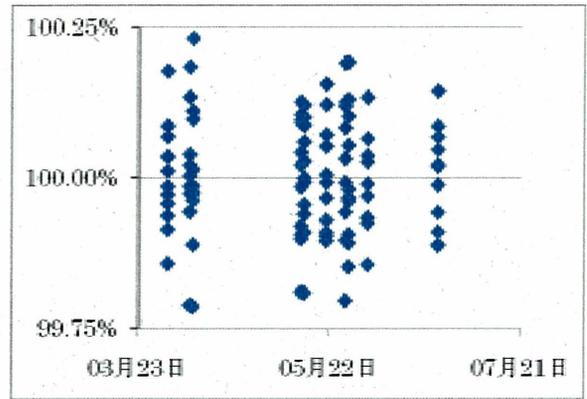


図5. 測定日中のビームラインの物理中心での測定値の変動

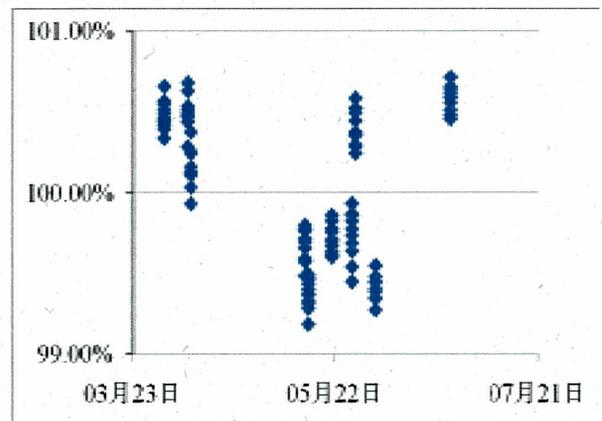


図6. 長期間でのビームラインの物理中心での測定値の変動

3. 今後の予定

現行ターゲットでは寿命が短いため新型 Be ターゲットの設計、製作を行っている[6]。中性子線の生物影響はエネルギー依存性が強いと考えられているため、単色（モノエネルギー）中性子線照射を目的とした p-Li 用の Li ターゲットの設計、作成を行っていく予定である。また Li ターゲットの製作に必要な Li 蒸着装置の開発を行っていく予定である。本装置はマウスなどの個体レベルの研究だけでなく、DNA、細胞レベルの影響評価研究も基盤研究推進の道具として重要であると考えている。さらに、本装置及び照射場の評価として他の施設で行われている生物研究と相互評価する意味でもコンベンショナルの照射室

での細胞を用いた基礎実験を継続的に行っていくことにしている。

参考文献

- [1] Y. Murata, T. Muroyama, Y. Kawabata, M. Yamamoto, Activation of Soil and Chemical Reagents Exposed to the Neutrons Released by the JCO Criticality Accident in Tokai-mura, *J. Radiat. Res.*, **42** (2001) S55–S74
- [2] S. Kojima, T. Imanaka, J. Takada, T. Mitsugashira, T. Nakanishi, R. Seki, M. Kondo, K. Sasaki, T. Saito, Y. Yamaguchi, M. Furukawa, Determination of Radionuclides Induced by Fast Neutrons from the JCO Criticality Accident in Tokai-mura, *J. Radiat. Res.*, **42** (2001) S45–S53
- [3] H. Takeda, K. Miyamoto, M. Yukawa, Y. Nishimura, Y. Watanabe, H.S. Kim, S. Fuma, N. Kuroda, F. Kouno, H. Joshima, T. Hiram, M.

Akashi, Bioassay for Neutron-Dose Estimations of Three Patients in the JCO Criticality Accident in Tokai-mura by Measuring β -ray Emitters, *J. Radiat. Res.*, **42** (2001) S129–S135

[4] D.J.W. Mous, J. Visser, A. Gott dang, R.G. Haitsma, A new range of high-current Tandetron™ accelerator systems with terminal voltages of 1–6 MV, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, **219–220** (2004) 480–484

[5] 小西輝昭、須田充、萩原拓也、酢屋徳啓、児玉久美子、前田武、高野裕之、濱野毅、今関等、放射線医学総合研究所技術報告書 (*NIRS Technology*)、**2**(2008) *this issue*.

[6] 萩原拓也、須田充、酢屋徳啓、小西輝昭、濱野毅、宮原信幸、高田真志、大町康、平岡武、今関等、放射線医学総合研究所技術報告書 (*NIRS Technology*)、**2**(2008) *this issue*.

X線発生装置 TITAN-320 型における線量測定結果

三井 大輔^{*1,2}、酢屋 徳啓¹、石川 剛弘¹、磯 浩之^{1,2}、今関 等¹

1)研究基盤技術部放射線発生装置利用技術開発課、2)株式会社ネオス・テック

Received 9 July 2008

要旨

2008年3月上旬、放医研X線棟第3照射室に前X線照射装置 PANTAK HF-320 型の後継機として X線発生装置 TITAN320 型が設置された。装置更新に伴い、X線発生装置 TITAN-320 型の線量測定を実施した。X線管焦点と照射台間距離(FSD)を変更することによって、3.51~0.21 Gy/min の範囲で照射が可能であり、高線量照射用回転テーブルを照射台に設置すると 5.00 Gy/min 以上(FSD23 5mm、照射野 100 mm)での照射が可能であることが確認された。

Keywords: X線、X線発生装置、線量率、空気吸収線量、照射野、電離箱、Focus Sample Distance (FSD)、半価層、実効エネルギー、イメージングプレート

***Corresponding Author:**

三井 大輔 (Daisuke Mitsui)

e:mail: d_mitsui@nirs.go.jp

1.はじめに

TITAN-320 型は PANTAK HF-320 型の後継機として導入されたので、できるだけ PANTAK HF-320 型と同じ照射条件で実験ができるよう、装置仕様は工夫した。PANTAK HF-320 型はここ数年、マシントラブルを頻繁に起こすだけでなく、主要部品の生産停止に伴いメーカーのサポートを受けることができなくなってしまったことなどが、今回の装置更新に至った理由である。

2.TITAN-320 型概要と測定機器

2.1 TITAN-320 型の特徴

TITAN-320 型は米国 GE 社製であり、電動シャッター機構や一部制御パネルは島津製作所によって製作されている。主な特徴として、X 線照射線量が多い、高い安定性・再現性、簡単な操作、高機能ウォームアッププログラム、保護警報機能などが上げられる。主な仕様は連続定格出力最大 200 kV 21.8 mA、高速開閉シャッター装備、10 種類の Filter から 1 種類を装着、X 線管上下ストローク 1200 mm(床 上 700 mm~1900 mm)、X 線管回転角度は垂直方向 360°・直角方向 100°、照射台寸法 700×700 mm(天板材質アクリル)・積載重量 20 Kg、高線量照射用回転ステージ装備(取り外し可能)である。図 1 は TITAN-320 型の外観写真である。

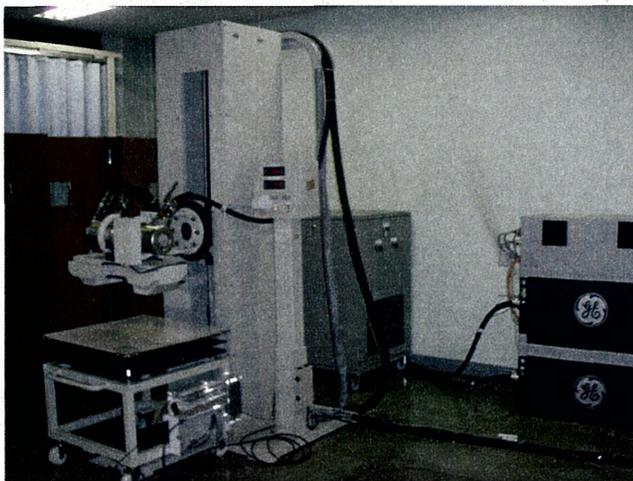


図 1 TITAN-320 型外観。

2.2 X 線管

X 線管はスイス国 COMET 社製の MXR350-26 メタルセラミック X 線管球である。焦点寸法は小焦点 $d=3.0$ mm・大焦点 $d=5.5$ mm(切替式)、定格出力 4.2 kW、照射窓材質 3.0 mm ベリリウム、ターゲット材質はタングステン、ターゲット設置角度 20°、照射角 40°、冷却媒体は油、丸型コリメーターを装備、筐体は円筒型であり横 546 mm、直径 168 mm という仕様である。

2.3 測定機器

今回の線量測定には応用技研製 JARP 型電離箱 C-110 を使用した。主な仕様は主電極 0.5 mm ϕ 、高圧電極 0.5 mm 厚アクリル樹脂、実効容量 0.6 ml である。電離箱からの出力は応用技研製電位計 AE-130L にて電圧として読み取る。AE-130L はアナログ出力であるため、AE-130L を横河電機製マルチメーター 756101 に接続しデジタル値にて計測している。電離箱 C-110、電位計 AE-130L、横河電機製マルチメーター 756101 を 1 組として、2 年毎に産業技術総合研究所にて校正を行っている。産業技術総合研究所での校正結果を表 1 に示す。その他に、線量分布を視覚にとらえることができる、FUJIFILM 社製フルオロイメーシングアナライザー FLA-5100 とイメージングプレート BAS-MS2025(以下、IP)も使用した。

表 1 産業技術総合研究所による校正結果。

管電圧 (kV)	線質 (keV)	半価層 (mm)	校正定数 (Gy/V)	不確かさ (%)
200	80	1.01 Cu	0.851	1.2
175	70	0.73 Cu	0.847	1.2
150	60	0.48 Cu	0.843	1.2
125	50	0.30 Cu	0.842	1.2
100	40	4.52 Al	0.844	1.2

3.照射野の調整

3.1 IPによる線量分布の確認

照射野の調整作業は、X線管架台と照射台の水平確認作業から始めた。照射台の水平が保たれていない状態では、照射野として表示している同心円が歪んでしまうからである。X線管架台と照射台の水平が保たれている時を初期状態とし、IPにて線量分布の確認を行った。その結果を図2に示す。IPは高感度なため、通常の照射条件(管電圧 200 kV、管電流 20 mA)では読み取り限度を超えてしまうので、読み取り限度を超えぬような照射条件に変更する必要があった。今回は管電圧 80 kV、管電流 5 mA、照射時間 6 sec、Filter 4.5 mm Cu + 0.5 mm Al、FSD 550 mm という条件にて照射を行った。図2からは照射野全体が照射台中心点(+)より右方向にあるということが確認できた。

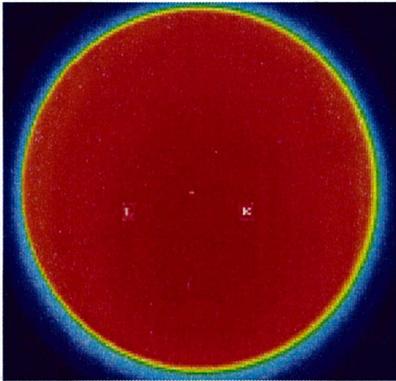


図2 照射条件 80 kV・5 mA・6 sec・
Filter Cu 4.5 mm + Al 0.5 mm での線量分布

3.2 電離箱を用いた線量分布測定と照射野決定

3.1 では IP を用いて線量分布の確認をした。放射線発生装置利用技術開発課では焦点線量率の 90% を満たすことのできる点を照射野としてユーザーに保障しているので、ここでは電離箱を使用し、より精密に中心を合わせていくことを試みた。測定条件は管電圧 200 kV・管電流 20 mA・Filter Cu 0.5 mm + Al 0.5 mm・FSD 550 mm・測定時間 60 sec とした。+方向とは照射台中心から右側、-方向は左側である。FSD 550 mm X 軸では照射台中心の 1.068 Gy/min が最も高い線量率であった。焦

点線量率の 90% を満たす点は、+方向 105 mm 0.965 Gy/min (90.3%)、-方向 -95 mm 0.960 Gy/min (90.0%) という結果であった。双方向でのバランスが非常に悪く、+方向へ片寄っていることがわかった。±方向とも均一な距離をとれるよう調整する必要がため、X線管を右方向へ傾けていき、左右のバランスを調整した結果、+方向 100 mm の点で 0.968 Gy/min (90.1%)、-方向は -100 mm の点で 0.967 Gy/min (90.1%) という結果となり左右のバランスをとることができた。この時点で X 線管は右方向へ 1° 傾いており、ここで固定した。FSD 550 mm での X 軸方向の照射野は +100 mm ~ -100 mm と決定した。Y 軸方向も X 軸と同様に調整した結果、+方向 110 mm の点で 0.971 Gy/min (90.5%)、-方向は -110 mm の点で 0.972 Gy/min (90.6%) となった。Y 軸のほうが X 軸より大きく照射野をとることができるが、これでは照射野が楕円になってしまうため、X 軸と同様に +100 mm ~ -100 mm と決定した。Y 軸の +方向とは照射台中心から奥側、-方向は手前側である。よって FSD 550 mm での照射野は直径 200 mm であり、線量率は 1.07 ~ 0.97 Gy/min となった。その結果を図 3~6 に示す。

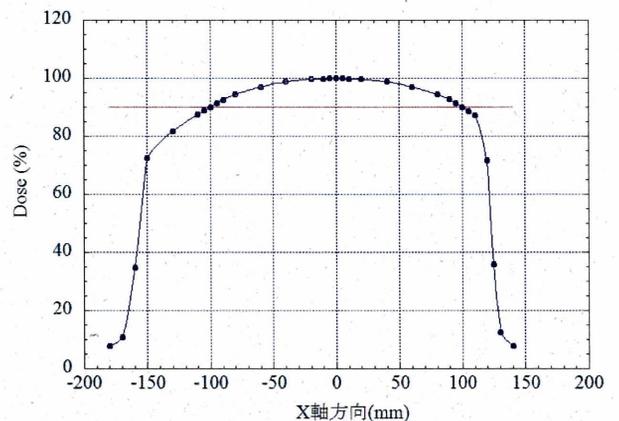


図3 TITAN-320型のX軸線量分布(FSD=550 mm)。

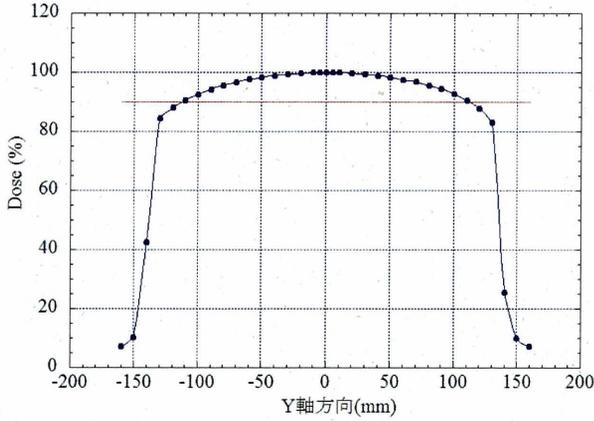


図4 TITAN-320型のY軸線量分布(FSD=550 mm)。

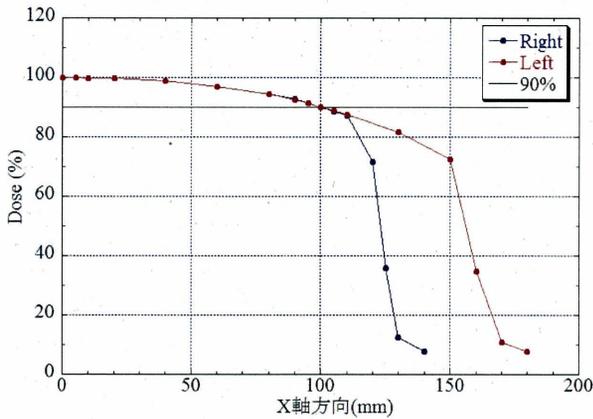


図5 ITAN-320型の線量分布左右対称性(X軸)。X線管を右方向に傾けているため、線量分布全体の対称性はない。有効照射野である焦点線量率の90%を満たす線量域ではほぼ左右対称である。

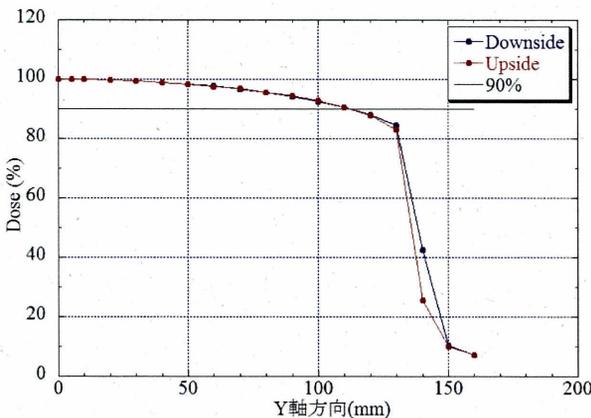


図6 TITAN-320型の線量分布左右対称性(Y軸)。

4. ビーム中心軸

3.2の作業により焦点と照射台物理中心とを合わせることができ、上下左右のバランスも調整作業が終了したので、次いで各FSD(300~1200 mm)でのビーム中心軸の変化を測定した。図7にビーム中心軸の線量分布を示す。照射台からの散乱線などの影響で逆二乗則とは異なる結果となった。中心軸を測定したことにより、90%を満たす線量率を算出することができ、各FSD照射野の線量率を決定した。各FSDでの照射野半径は双方の関係グラフを作成し、その傾きから求めた。その結果を表2に示す。

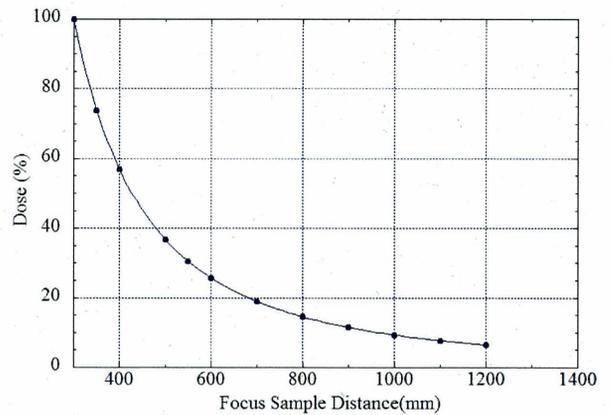


図7 TITAN-320型のビーム中心軸線量分布。

表2 各FSDでの照射野直径と線量率。

FSD (mm)	照射野直径 (mm)	線量率 (Gy/min)
300	100	3.51~3.16
400	140	2.00~1.81
500	180	1.30~1.17
550	200	1.07~0.97
600	220	0.91~0.81
700	260	0.66~0.59
800	300	0.51~0.46
900	330	0.41~0.37
1000	370	0.33~0.30
1100	400	0.27~0.24
1200	440	0.23~0.21

5. 半価層の測定

TITAN-320 型の通常運転時の照射条件(200 kV、20 mA、FilterCu0.5 mm+Al0.5 mm)にて銅の半価層測定を行い、実効エネルギーを求めた。X線管焦点と線量計間距離は1 mとし、双方の間に半価層測定用コリメーターを設置した。コリメーターからの散乱線が入射しないよう、コリメーターは出来る限りX線管に近づけて測定を行った。半価層の測定は周囲

の壁や床からの散乱線が線量計の入射しないよう考慮しなければならないが、この条件でも照射装置の設置位置や照射場の広さなどの関係から散乱線の影響はあると思われる。半価層の測定結果を図8に示す。求めた実効エネルギーは85 keVであり、他のFilterでも同様の測定を行った結果、FilterCu1.0 mm+Al1.0 mm挿入時は99 keV、FilterCu0.3 mm+Al1.0mm挿入時は78 keVである。

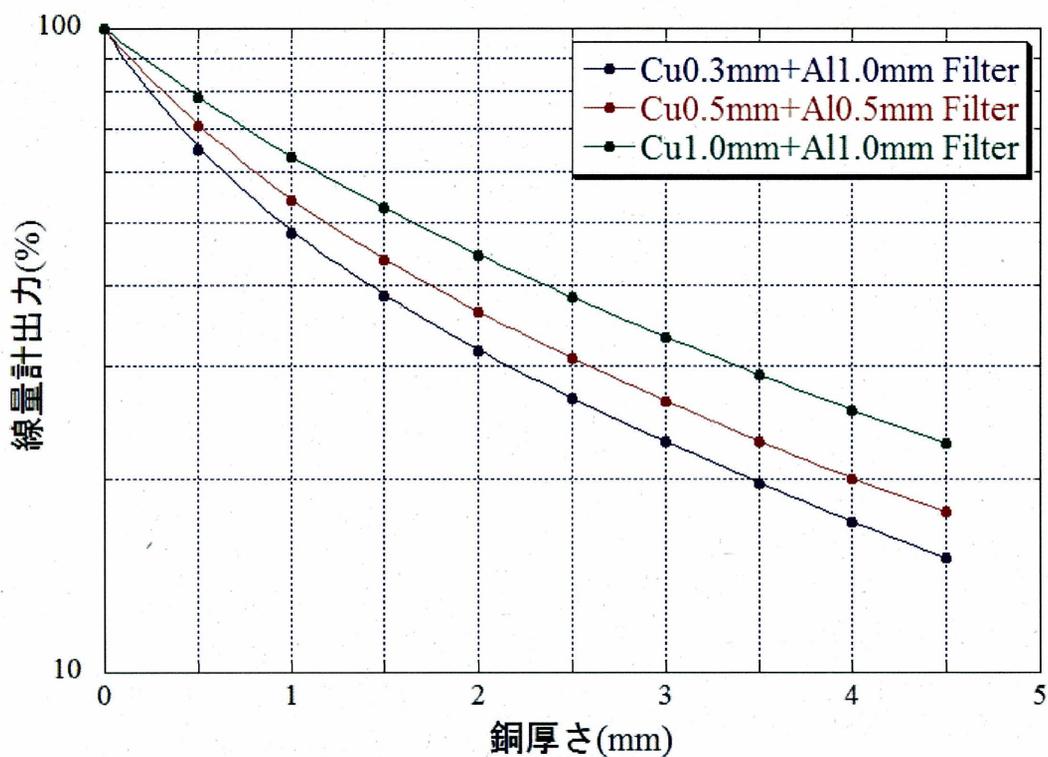


図8 TITAN-320型 各Filter 減弱曲線。

6. 管電流特性

TITAN-320 型は管電圧 200 kV 時に管電流を 1 ~ 21.8 mA の範囲で変更(0.1 mA ステップ)することができる。X 線管焦点-照射台間距離(FSD)の変更とともに管電流を変更すれば、更なる低線量照射が可能である。管電流に対する線量率の変化を電離箱 C-110、電位計 AE-130L、横河電機製マル

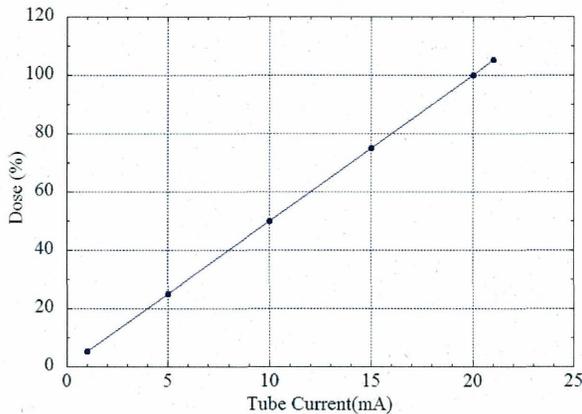


図 9 TITAN-320 型 管電流と線量率の関係。

7. 高線量照射用回転テーブル

TITAN-320 型は FSD を変更することで、3.51 ~ 0.21 Gy/min の範囲で照射が可能であり、X 線管焦点と照射台間距離は最大で 300 mm まで近づけることができる。更に照射台に高線量照射用回転テーブルを置くことで、X 線管焦点と照射台間距離を 230 mm まで近づけることができ、5.00 Gy/min 以上(照射野 100 mm)での照射が可能である。高線量照射用回転テーブルの主な仕様は寸法 $\phi 200 \times 200$ (H) mm、重量 10 Kg 以下、耐荷重 500 g、回転機能つき(回転速度 2 rpm)となっている。図 10 は照射台に高線量照射用回転テーブルを設置した時の写真である。

高線量照射用回転テーブル設置時の線量分布を電離箱 C-110、電位計 AE-130L、横河電機製マル

チメーター756101にて測定した。測定条件は管電圧 200 kV・管電流 20 mA・Filter0.5 mm Cu + 0.5 mm Al・FSD550 mm・測定時間 60 sec とした。測定結果を図 9 に示す。管電流と線量率は比例関係にあり、管電流 20 mA を 100%としたとき、管電流を 75%に下げると線量率も同様に下がることがわかった。

チメーター756101にて測定した。測定条件は管電圧 200 kV・管電流 20 mA・FilterCu0.5 mm+Al0.5 mm・FSD235 mm・測定時間 60 sec とした。測定結果を図 11 に示す。図 10 を見ると、X 線管と高線量照射用回転テーブル間の距離がかなり近いことがわかる。10 cm シャーレを 1 つ設置するスペースしかなく、電離箱での測定はかなりの工夫が必要であった。ビーム中心の線量率は 5.68 Gy/min であり、高線量照射用回転テーブル上は焦点線量率の 90%を満たす線量域である。

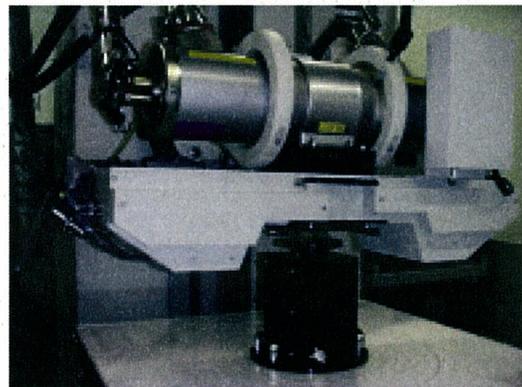


図 10 TITAN-320 型照射台と高線量照射用回転テーブル

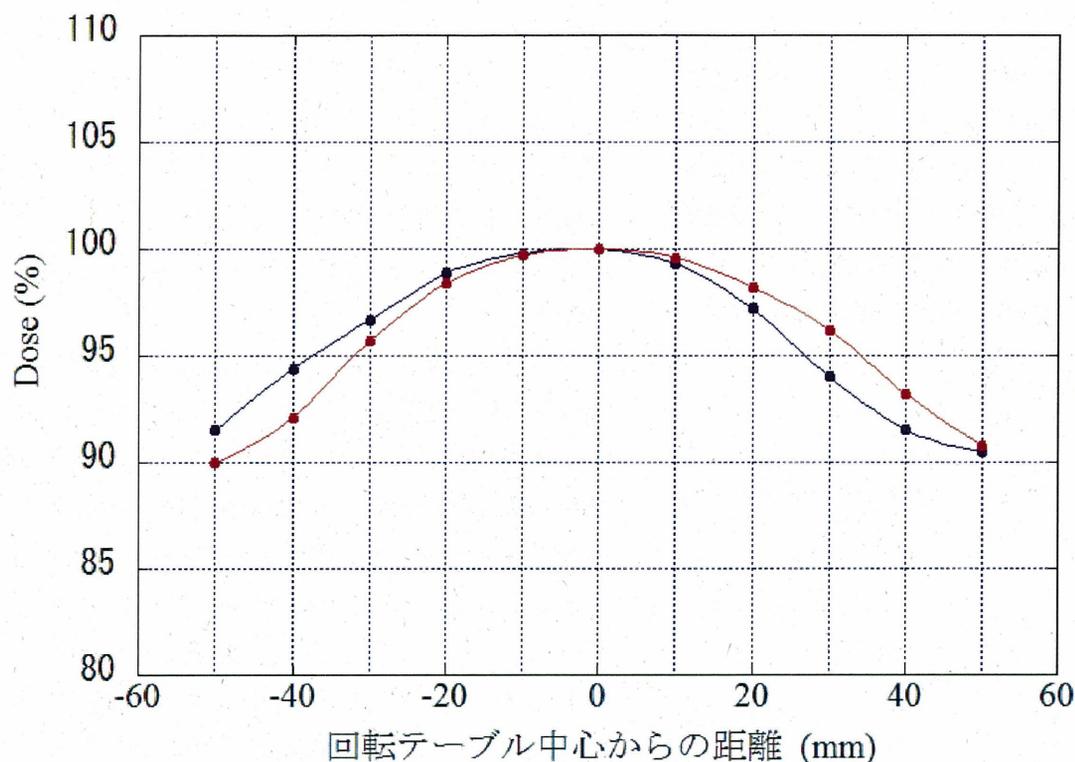


図 11 TITAN-320 型高線量照射用回転テーブル上での線量分布。青線は X 軸線量分布、赤線は Y 軸線量分布である。

8. まとめ

今回の測定で X 線発生装置 TITAN-320 型における、基礎となるデータはとり終えた。しかしながら高線量照射用回転テーブル設置時の測定方法や、線量測定手順など、課題が多く残されている。等線量曲線の作成、各付加 Filter の半価層測定が残っているので、順を追って測定する予定である。また、TITAN-320 型は一部の照射方法でしか使用されておらず、実際には付加 Filter の変更やコリメーターの設置など、様々な照射方法(条件)がある。様々な照射条件の測定データを技術報告書や放射線発生装置利用技術開発課ホームページにて報告し、TITAN-320 型をより深く知ってもらえることができるように努めたい。

引用文献

- [1] 平岡武、三井大輔、石川剛弘、濱野毅、宮原信幸、軟 X 線の線量測定、医用標準線量 Vol.12 No.2(2007)
- [2] 島津製作所、TITAN-320 型取扱説明書

[3] 山田勝彦 著、放射線測定技術、通称産業研究社(2005)

[4] 立入弘 編、診療放射線技術、南江堂(1973)

[5] 阪井英次 訳、放射線計測の理論と演習、上下巻、現代工学社(初版 1986)

静電加速器棟 (PASTA&SPICE) における利用状況

磯 浩之*^{1,2}、石川 剛弘¹、樋口 有一^{1,2}、三井 大輔^{1,2}、小西 輝昭¹、及川 将一¹、
酢屋 徳啓¹、濱野 毅¹、今関 等¹

- 1)独立行政法人 放射線医学総合研究所 基盤技術センター 研究基盤技術部
- 2)株式会社ネオス・テック 研究支援技術部 技術1課

Received 11 July 2008

要旨

静電加速器棟・PIXE 分析用加速器システム (PASTA) は、放射線医学総合研究所において、産学連携や研究交流を図りつつその成果を社会に還元する活動の一環として、2004年3月「共用施設・設備」に指定され、以来、外部機関の方々にも広く利用されてきた。2007年においては、共同研究数が13件もあった。年の途中でスタートした共同研究もあり、マシンタイムを確保するためにメンテナンスの時間を短縮するしか方法はなく、週始めのメンテナンス日を割り当てるなどして対処した。SPICEにおいては、開発とは別にマシンタイムとしての提供も増えたため、週始めのマシンタイム等を開発のために割り当てるなどで対処した。今後、外部利用も増えた現状に沿って無理のないマシンタイム実施計画を策定するため、利用希望内容の正確な把握やメンテナンス時間・開発時間の最適化を期するため、PASTA 及び SPICE のマシンタイムを決定する前に、第三者（共同実験施設運営委員会静電加速器棟利用部会）による実験課題の客観的な評価を行う制度を2008年度から導入することにした。

Keywords: PASTA、PIXE、SPICE、Maintenance

***Corresponding Author:**

磯 浩之(Hiroyuki Iso)

e-mail iso@nirs.go.jp

1. はじめに

静電加速器棟 (PIXE Analysis System on Tandem Accelerator facility: PASTA) [1, 2]には、PIXE 分析用に3、細胞照射用に1の計4つのビームラインがある。静電加速器は、High Voltage Engineering Europe 社製 Tandetron Model 4117MC でターミナル電圧 0.1~1.7 MV である。イオン源は、デュオプラズマトロンを2基備えており、加速管出口の最大定格ビーム電流は 5 μ A (3.4 MeV ($^1\text{H}^+$)) である。当初、本施設は図1に示すように PIXE 分析専用システムとして設計された。

PIXE 分析法は、加速されたイオンビームを試料に照射し、励起され発生する特性 X 線のエネルギーと数を測定して元素分析を行う方法である。少ない試料でも繰り返し測定できる、定量可能な多元素同時分析法である。また、高感度である特性により、環境科学や生物・医学の研究分野で元素の挙動解析や濃度分布を得る方法として数多く幅広く利用されている。[3-5] 放医研においては主に、大気エアロゾル中 (浮遊粒子状物質, スモッグ, 黄砂など) に含まれる重金属類 (Cr, Cu, Ni, Zn, As, Cd, Pb など) を測定することで、環境における挙動解析を行っている。[6] 最近では、生態学分野においても利用されており、水中生物、シロアリの歯などの元素分析が行われるようになった。

ビームラインの一つは、コンベンショナルな PIXE 分析システム [1, 7] で、0.5~2.0 mm 角までの任意のビームサイズで、円盤状のサンプルホルダによって一度に 15 個の試料を真空中に置き、連続的に測定可能である。二つ目は、マイクロビームスキヤニング PIXE 分析システム (以下、 μ -PIXE) で、マイクロビーム化された陽子線をスキヤンコイルで走査し、位置分解能 1 μ m で、最大 2 mm 角の範囲を分析可能である。[8, 9] 三つ目は、気中照射 PIXE 分析システム (液滴 PIXE 分析システム) で、ヘリウム雰囲気中に陽子線を取り出し、真空チャンバーには入れられない大きなサイズのものやウェットなサンプルなどを分析することができる。また、液体試料がそのまま測定できる droplet-PIXE が備えられている。[10] また、液滴 PIXE 分析時において

は HPLC も同時利用可能である。[11] 各ビームラインの X 線検出器は Si(Li) 検出器であり、コンベンショナル PIXE システムにのみ PGe 検出器も設置している。また、 μ -PIXE の技術を利用し、既存の μ -PIXE ライン上にマイクロビーム細胞照射装置 (SPICE) も併設されている。[12-14] SPICE は、5 μ m 以下の 3.4 MeV プロトンビームを大気に取り出し任意の細胞に任意の発数のプロトンを照射することができ、バイスタンダー効果等の放射線生物影響研究に使われている。

本施設は「共用施設・設備」であり、且つ多種多様な研究ニーズに応えるために放射線発生装置利用技術開発課が装置改良のための技術開発を行っているが、マシンタイムを提供するに当たって共同研究契約件数の増加に呼応した問題、例えば希望に供給が追いつかないなどの問題が起こり、その対応が迫られた。

今回の報告では、2007 年のマシンタイム利用状況との新しい申請方法等マシンタイムのマネジメントに着手した事を報告する。

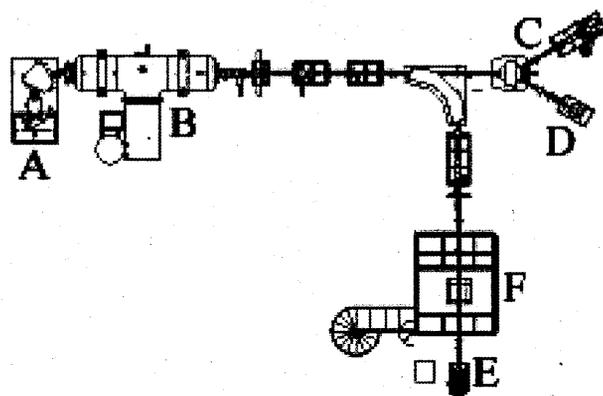


図1. PASTA&SPICE 構成図

A デュオプラズマトロンイオン源×2基、B タンデム型加速器本体、C コンベンショナル PIXE 分析装置、D 気中照射 PIXE 分析装置 (droplet-PIXE)、E μ -PIXE、F マイクロビーム細胞照射装置 (SPICE)

2. 加速器運転状況

2007 年は、大きなマシントラブルはなく運転・測定共に順調に稼働し、総運転時間は 2,185 時間であった。加速粒子は主に陽子であり、 μ -PIXE と SPICE のマシンタイムが総運転時間の 60 % 以上を占めた。2007 年ビームライン毎の利用日数と利用時間を図 2 に示した。また、2007 年マシンタイムにおけるビームライン毎の利用内訳を表 1 に示した。

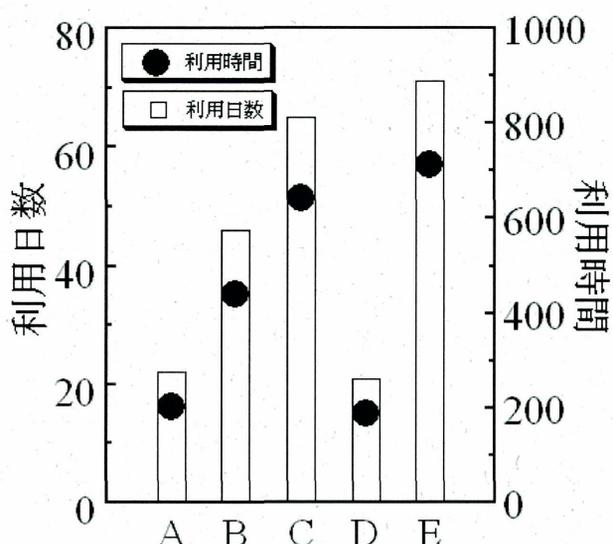


図 2. ビームライン毎の利用日数と利用時間
A メンテナンス、B コンベンショナル PIXE、C μ -PIXE、D 気中照射 PIXE(droplet-PIXE)、E マイクロビーム細胞照射(SPICE)

表 1. ビームライン毎の利用内訳

用途	所内利用件数 [day]	外部利用件数 [day]	サンプル総数
Maintenance	22	-	-
Conventional-PIXE	21	25	606
Microbeam scanning PIXE	16	49	280
in-air(droplet)PIXE	18	3	100
SPICE	71	-	-

3. おわりに

2007 年当初の予定はメンテナンスに必要な時間を十分に考慮したものであったが、共同研究件数が増える毎に、メンテナンス時間等をそれに流用しマシンタイムを確保するなど、云わば、その場しのぎの方法で対応してきたと云える。また、マシンタイムに占める調整時間の割

合が μ -PIXE と SPICE では大きく割かれている。2007 年マシンタイムの当初の計画時間と実際のマシンタイムを集計した比較を図 3 に示した。

また、図 4 に示すように、2007 年と過去 3 年(2004~2007)の運転時間をそれぞれ 100 % としてビームラインの利用率を比較すると、 μ -PIXE と SPICE は年々、利用率が増加していることがわかる。SPICE では 5 μ m 以下のビームを常時、形成・提供するために、オペレーターの高いスキルだけではなく長時間のビーム調整時間が不可欠である。そのため現在では、ユーザーへの提供開始時間は 15 時以降になってしまうため終了時間が後延びする傾向にある。このように増加するマシンタイムの要求の実状に合ったマシンタイム計画を策定するために、共実委員会・静電加速器利用部会で、実験課題について客観的に事前評価を行い、マシンタイムを適切に割り当てることにした。同時に、記録の管理及びオペレーターとユーザー間の連携を図り、さらなる品質向上を目指している。

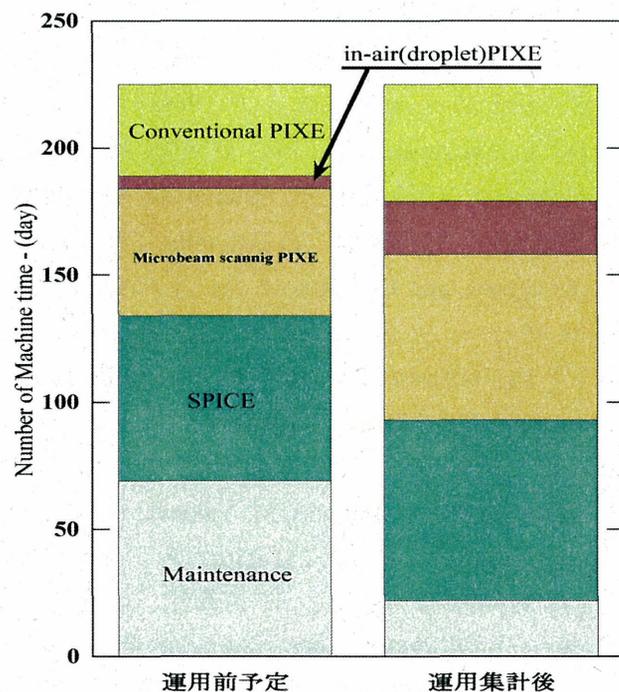


図 3. 2007 年マシンタイム計画時間と集計比較

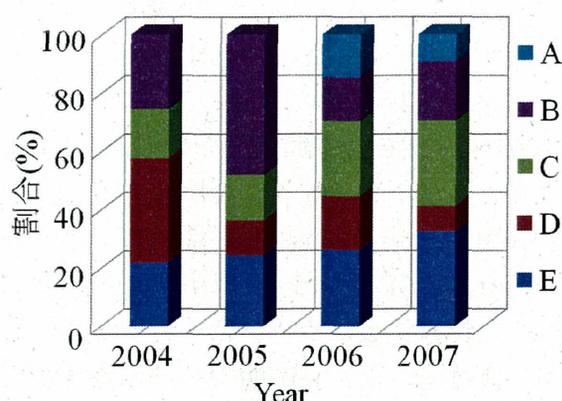


図4. ビームライン利用割合

A メンテナンス、B コンベンショナル PIXE、C μ -PIXE、D 気中照射 PIXE(droplet-PIXE)、E マイクロビーム細胞照射(SPICE)

5. 引用文献

[1] H. Imaseki, and M. Yukawa, *Int. J. PIXE*, **10** (2000) 77-90

[2] M. Yukawa, and H. Imaseki, *Biomed. Res. Trace Elements* **14** (2003) 11-16

[3] M. Ishikawa, K. Kitao, H. Imaseki, T. Ishii, and A. Shiragai, *Nucl. Inst. Meth. B.*, **3** (1984) 114-118

[4] S. Matsuyama, K. Ishi, S. Abe, H. Ohtsu, H. Yamazaki, Y. Kikuchi, T. S. Amartaivan, K. Inomata, Y. Watanabe, A. Ishizaki, Y. Barbotteau, A. Suzuki, T. Ymaguchi, and G. Momose, *Int. J. PIXE*, **15** (2005) 41-45

[5] M. Yukawa, K. Aoki, H. Iso, K. Kodama, H. Imaseki, Y. Ishikawa, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **272** (2007) 345-352

[6] K. Saitoh, H. Imaseki, M. Yukawa, O. Nagafuchi, *Int. J. PIXE*, **12** (2002) 231-236

[7] 石川剛弘、磯浩之、小西輝昭、北村尚、濱野毅、今関等、PIXE 分析における定量法の確立(1)～ビーム電流リアルタイム測定システムの開発～。放射線医学総合研究所技術報告書 (*NIRS Technology*), **1** (2007) 37-42

[8] T. Hamano, H. Imaseki, M. Yukawa, T. Ishikawa, H. Iso, and K. Matsumoto, *Int. J. PIXE*, **13** (2003) 37-43

[9] H. Imaseki, M. Yukawa, F. Watt, T. Ishikawa, H.

Iso, T. Hamano, K. Matsumoto, N. Yasuda, *Nucl. Instr. and Meth. B.*, **210** (2003) 42-47

[10] H. Imaseki, K. Ishii, T. Ishikawa, H. Iso, T. Shinomiya, T. Hamano, and M. Yukawa, *Int. J. PIXE* **15** (2005) 293-299

[11] 磯浩之、小西輝昭、石川剛弘、三井大輔、今関等、湯川雅枝、液滴 PIXE 分析装置への HPLC 導入。放射線医学総合研究所技術報告書 (*NIRS Technology*) **1** (2007) 32-36

[12] H. Imaseki, T. Ishikawa, H. Iso, T. Konishi, N. Suya, T. Hamano, X. Wang, N. Yasuda, M. Yukawa, *Nucl. Inst. Meth. B.*, **260** (2007) 81-84

[13] X. Wang, T. Konishi, T. Hamano, N. Yasuda, H. Imaseki, T. Ishikawa, H. Iso, N. Suya, M. Yukawa, Development of single particle microbeam irradiation system for radiation biology. *NIRS Technology* **1** (2007) 8-13

[14] 小西輝昭、児玉久美子、大熊俊介、磯浩之、石川剛弘、安田仲宏、檜枝光太郎、今関等、SPICE マイクロビーム照射装置を用いた生物実験のための細胞試料作成法。放射線医学総合研究所技術報告書 (*NIRS Technology*), **1** (2007) 24-31

Micro scanning PIXE における照射量測定システムの開発 その1

石川 剛弘*¹、磯 浩之^{1,4}、及川 将一¹、小西 輝昭¹、北村 尚²、
樋口 有一^{1,4}、酢屋 徳啓¹、濱野 毅¹、今関 等³

- 1) 基盤技術センター研究基盤技術部放射線発生装置利用技術開発課
- 2) 基盤技術センター 研究基盤技術部放射線計測技術開発室
- 3) 基盤技術センター 研究基盤技術部
- 4) 株式会社 ネオス・テック 研究支援技術部 技術1課

Received 11 July 2008

要旨

イオンビームを用いた元素分析法の一つである PIXE 分析法は、多元素を同時に分析することができることから、定性面の分析において数多く研究に用いられているが、近年では検出感度の向上と定量化が強く望まれるようになった。そのため我々は、二次元元素マップの取得が可能なマイクロビームスキニング PIXE 分析ラインにおいても定量化のための技術開発を進めることにした。定量化において、試料に対するイオンビーム照射量の正確な測定が必須であることから、電流モニタの開発から着手した。現在、予備実験中であるが、その途中経過を報告する。

Keywords: PIXE、二次電子、CEM、イオンビーム照射量、定量

**Corresponding author:*

Takahiro Ishikawa

e-mail: takahiro@nirs.go.jp

1.はじめに

荷電粒子励起 X 線分析法(Particle Induced X-ray Emission : PIXE)は、加速器から取り出された陽子線を試料に照射すると、特性 X 線を放出する。この X 線のエネルギーと発生量を測ることにより、試料中に存在する元素の同定と定量を行うことができる。

PIXE 分析法は、高感度に多元素同時分析法であり、少量の試料でも測定が可能であることから、近年、加速器を持つ様々な研究・教育機関において、生物・医学試料の分析やエアロゾル等の環境試料分析に盛んに応用されている。

放医研においても PIXE 分析用加速器システム PASTA (PIXE Analysis System and Tandem Accelerator: PASTA) [1, 2]を用いた共同研究等で、様々な分野に利用されている[3-7]。PASTA は、PIXE 分析専用として設計され、タンデム型静電加速器とコンベンショナル PIXE ライン[1]、二次元素マップの取得が可能なマイクロビームスキャンング PIXE 分析ライン[8, 9]、液体試料など真空中に入れることが困難な試料の分析が可能な気中照射 PIXE 分析ライン[10]の 3 本の PIXE 分析ラインを有している。昨年度、コンベンショナル PIXE 分析ラインにおいて、ビームチョッパー型のビームモニタ[11]を開発した。

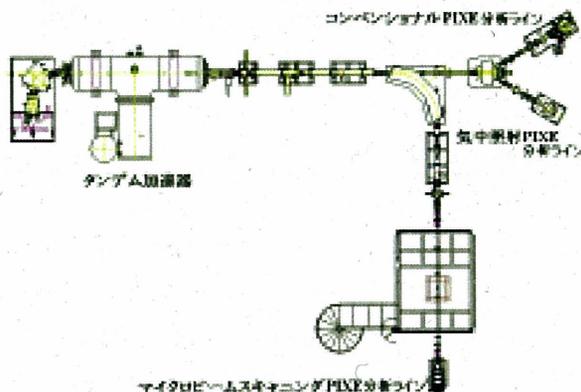


図1 放医研の PIXE 分析用施設(PASTA) を上から見た構成図。PIXE 分析用としてコンベンショナル PIXE 分析ライン、マイクロビームスキャンング PIXE 分析ライン、気中照射 PIXE 分析ラインの

3 本ビームラインがある。

マイクロビームスキャンング PIXE 分析ラインでは、イオンビームを最大 2 mm×2 mm の範囲でスキャンし、位置分解能 1 μm の精度で、Si(Li)検出器を用い、複数の元素マップを取得することが可能である。マイクロビームスキャンング PIXE において、試料の条件によっては、照射量を正確に計測することができなかつたが、試料の状態に関係なく、照射量を計測できる電流モニタの開発を開始した。

2. マイクロビームスキャンング PIXE での問題点

PIXE 分析における定量法として、内部標準法と、外部標準法がある。しかし、いかなる方法であっても試料へのビーム照射量を正確に知る必要がある。しかし、ターゲット電流を直接測ることは、薄い測定試料では、透過したイオンのビーム電流は測れるが、厚い試料では透過イオンのビーム電流を測定することができず、更には試料によっては電荷の蓄積(チャージアップ)が起き得ることから、ビーム照射量を正確に評価することが困難である。

そのため、ターゲットの状態に関係なく、また、スキャンしているイオンビームの妨げにならないビーム電流リアルタイムモニタの開発が必要となった。

3. Annular type SSD を用いた二次電子型ビームリアルタイム電流モニタの検討

マイクロビームスキャンング PIXE 用リアルタイム電流モニタの開発に当たっては、開発条件以下の 2 点に絞って進めた。

- ・測定の妨げにならず、ビーム電流の推定が可能であること。

- ・ビーム電流との間に直線関係が成り立つこと。

まず、ビーム電流を推定するには、間接的な方法で測定する必要がある。ビームが物質に当たったときに発生する二次電子と照射電流の関

係を調べた。しかしながら、試料の形状及び導電性等で二次電子の発生量が異なるので、試料上流側のチャンバー内に透過可能な薄膜を設置することにより、そこから発生する二次電子を測定することにした。この薄膜の材質は PIXE の測定に影響を与える重元素を含まない材質を選択する必要があり、今回選択したのは、PIXE の検出範囲外のカーボン薄膜（ニラコ(株)製：カーボン蒸着膜 $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ （計算上 50 nm））を採用した。

次に二次電子の検出器を検討した。チャンバーは、スペースに余裕がなく、出来るだけコンパクトである必要があるため、Annular type の半導体粒子検出器（SSD）を検討した。

図 2 に Annular type SSD を用いた二次電子型ビームリアルタイム電流モニタの概念図を示す。Triplet Q-magnet 下流側にカーボン膜を設置し、更に後方に Annular type SSD を置く。この条件で二次電子の発生量のシミュレーションを行った。

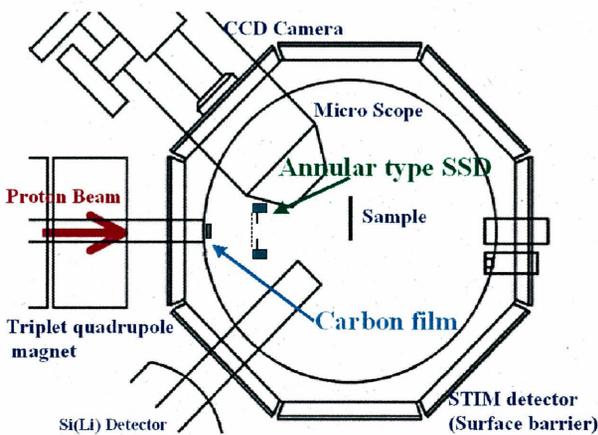


図 2 Annular type SSD を用いた二次電子型ビームリアルタイム電流モニタ概念図。Triplet Q-magnet 下流側にカーボン膜を設置し、更に後方に Annular type SSD を置く。

図 3 に薄膜で発生した二次電子と Annular type SSD との関係をシミュレーションした結果を示す。GEANT4 release 9.1 patch02 を用いてシミュレーションを行った[12,13]。Annular type SSD は、内径が 2 mm、外径が 6 mm とした。SSD

の電極として、50nm 厚のシリコンの入射窓を仮定した[14]。

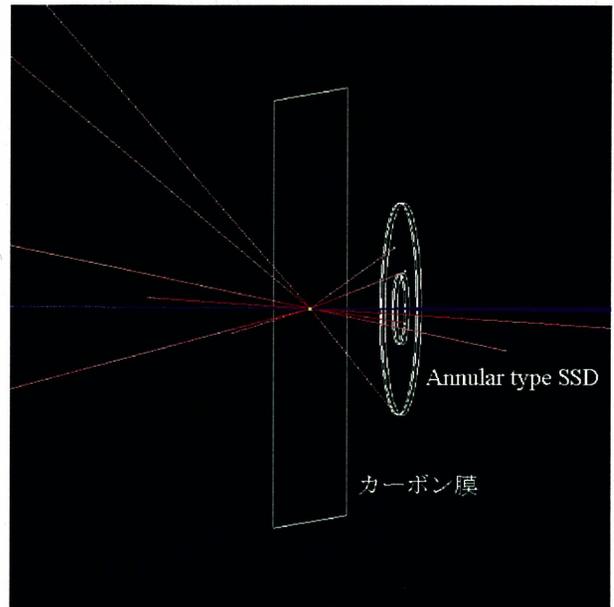


図 3 カーボン膜において発生した二次電子の軌道シミュレーション結果。青線が陽子線で、赤線が二次電子である。カーボンテープ中央の黄色点で発生している。検出器厚 $300 \mu\text{m}$ 、空乏層厚 $100 \mu\text{m}$ で、検出器とカーボン膜の距離は 5 mm である。

図 4 にカーボン膜厚による Annular type SSD で検出される二次電子のエネルギー分布のシミュレーション結果を示す。 1×10^6 個の陽子を打ち込んでいる。その結果、二次電子のエネルギー分布の多くは数 eV ~ 5 keV であった。また、カーボン膜の厚みについては、150 nm より厚くしても二次電子の発生量は、大きく変わらないことがわかった。

以上のシミュレーションにより、発生する二次電子のエネルギーが低く、SSD の検出閾値を超えることが出来ないため、SSD は二次電子検出器として適さないことがわかった。また、カーボン膜に当たった陽子が散乱して、SSD に入射する影響も大きいと考えられた。そのため、Annular type SSD を用いた二次電子型ビームリアルタイム電流モニタの開発は困難であると判断した。

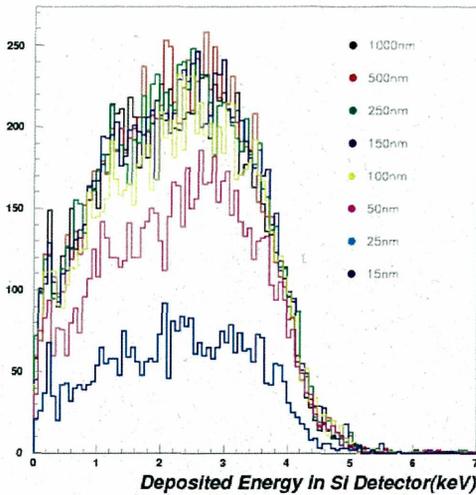
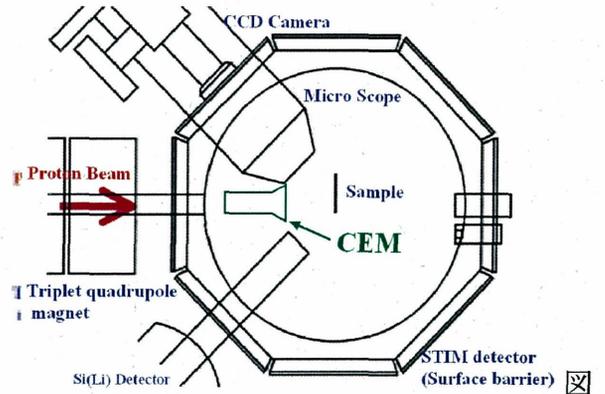


図4 Annular type SSD で検出される二次電子のエネルギー分布のシミュレーション結果。カーボン膜の厚み毎の二次電子の発生量。150 nm 以上では大きな差はない。

4. CEM を用いた二次電子型ビームリアルタイム電流モニタの開発

カーボン膜から発生する二次電子はエネルギーが低いので、前項で検討した Annular type SSD に変えて低エネルギーの二次電子も検出可能な、Ceramic Channel Electron Multiplier (CEM: AMPTEK MD-502) を導入することとした。この CEM を図 5 の様に設置した。また、二次電子を発生させるカーボン膜の取り付け方法も見直して、膜と試料の距離を極力短くし、ビームサイズの広がりを防ぐため、図 6 の様にビーム調整用の銅メッシュ(#2000)が貼り付けた 1 mm 厚のサンプルホルダの前面に、直径 3 mm の孔にカーボン膜を貼り付けたサンプルホルダを重ね合わせ設置した。また今回の実験においては、ビーム電流と二次電子との相関の調査を優先した。



5 CEM の設置位置。チャンバーのビーム軸直上に設置した。

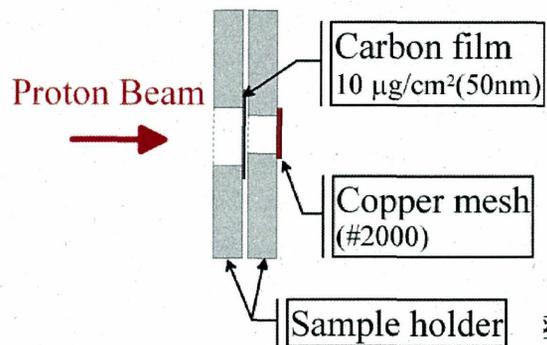


図6 カーボン膜と試料との位置関係。ビーム調整用銅メッシュ(#2000)が貼り付けられたサンプルホルダに重ねてカーボン膜のサンプルホルダがある。

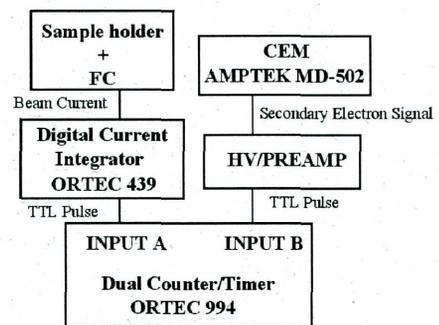
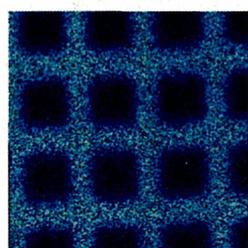


図7 測定システムの構成。二次電子を CEM で検出し、HV/PREAMP で TTL Pulse にしている。また、ビーム電流はサンプルホルダとサンプル後方にあるファラデーカップ(FC)にて検出し、Digital Current Integrator で TTL Pulse 信号にし、CEM とビーム電流の TTL Pulse を Dual Counter/Timer に入力してウントしている。

5. CEMの電流モニタとしての特性試験

照射ビーム電流とカーボン膜から発生する二次電子の量が、直線的な相関を有しているか確認することを目的として実験を行った。測定は通常 PIXE で使用している加速エネルギー：陽子 2.6 MeV、ビーム電流 10-100 pA の範囲で行った。電流値は銅メッシュとメッシュ後方に設置しているファラデーカップの 60 sec の積算電流を測定し、電流値の調整はオブジェクトスリットの開閉により行った。ビームは#2000 の銅メッシュで集束パラメータの調整を行い、マイクロビーム形成を確認した後、40 μm のスキャン領域で走査しながら照射した。CEM による二次電子計測は 30 sec 当たりの積算カウントを測定した。



Horizontal:
4.688-2.900=1.788 μm
Vertical:
16.25-14.53=1.72 μm

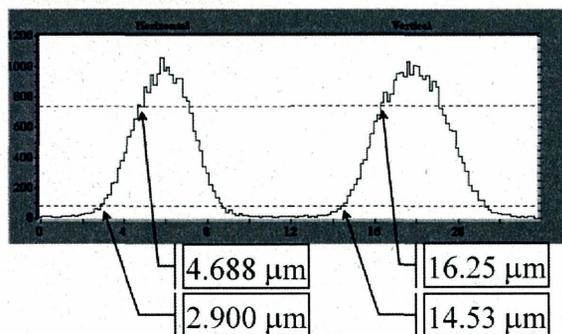


図8 カーボン膜透過後のビームサイズ測定結果。Off axis STIM で測定し、水平方向が 1.788 μm 、垂直方向が 1.72 μm の位置分解能であった

図8に銅メッシュの off-axis STIM (Scanning Transmission Ion Microscopy)[8]像と、その1次元プロファイルから導出したカーボン膜通過後のビームの位置分解能の結果を示す。この結果、ビームの位置分解能は水平方向が 1.79 μm 、垂直方向が 1.72 μm であった。通常のマイクロ PIXE 分析においては、常に 1 μm の分解能で測

定を行っているが、カーボン膜による散乱でビームサイズが大きくなっていることがわかった。

図9に 30 sec 測定でのビーム電流と CEM のカウント値の関係を示す。ビーム電流と CEM のカウントした二次電子が直線的な比例関係であることが確認できた。

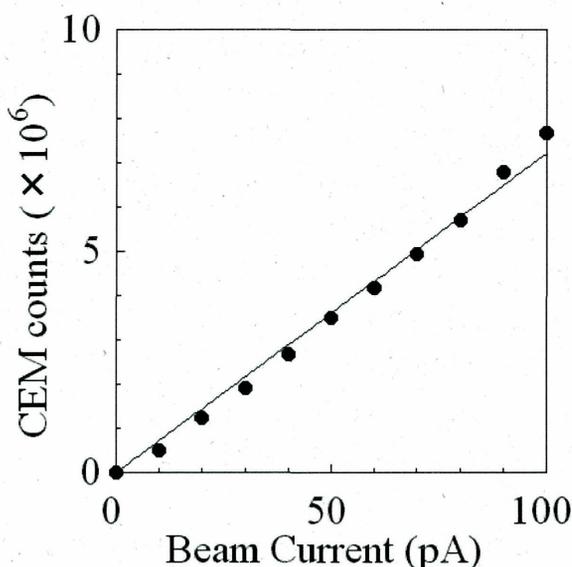


図9 ビーム電流毎の CEM による二次電子カウント値。ビーム電流とリニアにカウント値が測定できている。

6. まとめと今後の予定

今回の実験において、サンプル直前に設置したカーボン膜から発生する二次電子を計測することによって、照射量を推定できる可能性が示唆された。今のところ、40 μm \times 40 μm のスキャン領域でのみ測定しているが、今後はスキャンサイズを大きくした場合についても測定する予定である。また今後は、サイズの大きな測定試料にも対応する必要性があり、照射試料の大きさに合わせてカーボン膜の貼り付け面積も大きくできればよいと思っているが、現在のカーボン膜で、貼り付け技術を向上させ、それに合わせて膜の厚みや材質の検討を引き続き進める予定である。

引用文献

- [1]H. Imaseki, and M. Yukawa, *Int. J. PIXE*, **10** (2000) 77-90
- [2]M. Yukawa, and H. Imaseki, *Biomed. Res. Trace Elements*, **14** (2003) 11-16
- [3]M. Ishikawa, K. Kitao, H. Imaseki, T. Ishii, and A. Shiragai, *Nucl. Inst. Meth. B.*, **3** (1984) 114-118
- [4]S. Matsuyama, K. Ishii, S. Abe, H. Ohtsu, H. Yamazaki, Y. Kikuchi, TS. Amartaivan, K. Inomata, Y. Watanabe, A. Ishizaki, Y. Barbotteau, A. Suzuki, T. Yamaguchi, and G. Momose, *Int. J. PIXE*, **15** (2005) 41-45
- [5]M. Yukawa, K. Aoki, H. Iso, K. Kodama, H. Imaseki, Y. Ishikawa, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **272** (2007) 345-352
- [6]K. Saitoh, H. Imaseki, M. Yukawa, O. Nagafuchi, *Int. J. PIXE*, **12** (2002) 231-236
- [7]W. Ohmura, Y. Suzuki, H. Imaseki, T. Ishikawa, H. Iso, T. Yoshimura, Y. Takemetsu, *Int. J. PIXE*, **17** (2007) 113-118
- [8]T. Hamano, H. Imaseki, M. Yukawa, T. Ishikawa, H. Iso, and K. Matsumoto, *Int. J. PIXE*, **13** (1,2) (2003) 37-43
- [9]H. Imaseki, M. Yukawa, F. Watt, T. Ishikawa, H. Iso, T. Hamano, K. Matsumoto, N. Yasuda, *Nucl. Instr. and Meth. B.*, **210** (2003) 42-47
- [10]H. Imaseki, K. Ishii, T. Ishikawa, H. Iso, T. Shinomiya, T. Hamano, and M. Yukawa, *Int. J. PIXE*, **15** (2005) 293-299
- [11]石川剛弘、磯浩之、小西輝昭、北村尚、濱野毅、今関等、PIXE 分析における定量法の確立 (1)～ビーム電流リアルタイム測定システムの開発～、放射線医学総合研究所技術報告書 (*NIRS Technology*) **1** (2007) 37-42
- [12]S. Agostinelli, J. Allison, et al. *Nucl. Instr. and Meth. A* **506** (2003) 250-303
- [13]J. Allison, S. Tanaka, et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **53** (2006) 270-278
- [14] Passivated Implanted Planar Silicon (PIPS™) Detectors – Canberra Industries

NASBEE に導入した Be ターゲットの耐久性について (1)

萩原 拓也^{1,2}、須田 充²、酢屋 徳啓²、小西 輝昭²、濱野 毅²、
宮原 信幸²、高田 真志³、大町 康⁴、平岡 武²、今関 等⁵

- 1) (株) ネオス・テック
- 2) 基盤技術センター研究基盤技術部放射線発生装置利用技術開発課
- 3) 基盤技術センター研究基盤技術部放射線計測技術開発室
- 4) 放射線防護研究センター発達期被ばく影響研究グループ実験病理研究チーム
- 5) 基盤技術センター 研究基盤技術部

Received 11 July 2008

要旨

研究基盤技術部放射線発生装置利用技術開発課では、平成 15 年度に速中性子線照射用加速器システム Neutron Exposure Accelerator System for Biological Effect Experiment (以下 NASBEE) を導入した。このシステムは、加速された水素及び重水素イオンを Be や Li 等の固体金属ターゲットに照射し、発生する高フルエンスの速中性子をコンベンショナルな環境下 (生物照射室) 及び Specific Pathogen free (特定病原菌未感染: SPF) マウス、ラット等に照射することができることである。本システム導入時に新規に設計した Be ターゲットが 5 年間で 7 個作成し内 4 個がビームの熱による劣化のため破損した。照射で使用した場合の平均期間は約半年程度とわかった。破損の状況により分かった幾つかの構造的欠点も修正したので、これについて報告する。

Keywords: 中性子、線量、加速器、タンデム、ターゲット、Be (ベリリウム)、放射化

**corresponding author:*

萩原 拓也 (Takuya Hagihara)

e-mail: t_hagi@nirs.go

1.はじめに

NASBEEは0.1MeV~4MeVまでのエネルギーで、数~600 μ Aまでの水素及び重水素イオンを発生させることができる装置である。加速器詳細については、別途紹介する。[1] ターゲットの役割は、加速器により発生させた荷電粒子を、ターゲット部に使用したBe金属に衝突、核反応により中性子を発生させる事である。ターゲットから発生する中性子は、可能な限り単色性の高い中性子線であることが、正しい放射線影響リスクの評価上からも求められている。中性子生物影響研究において、統計的に有意のある実験データの取得には、長期にわたって同一の照射条件で照射実験を繰り返す必要がある。特に、マウス、ラットなどの個体レベルの放射線生物研究においては、マウスの導入時期などの実験的スケジュー

ールの関係から、年単位での照射条件の再現性が要求される。ビームの線質は、ターゲットの状態に依存する。つまり、破損などにより交換が必要となった場合、交換以前のビームの線量率または線質を完全に再現できるかどうかは不明である。そのため、ターゲットの寿命を最大限長く維持できるよう技術開発が必要となる。しかし問題点は加速器から発生する荷電粒子とBe金属の核反応を起こすターゲット部分で、Be金属が溶解剥離を起こしてしまうことが主な原因である。これらの解決のためには、十分な冷却が必要であると予想され、ターゲットの冷却をより効率よくするために現状の把握と、今後の改良計画について報告する。

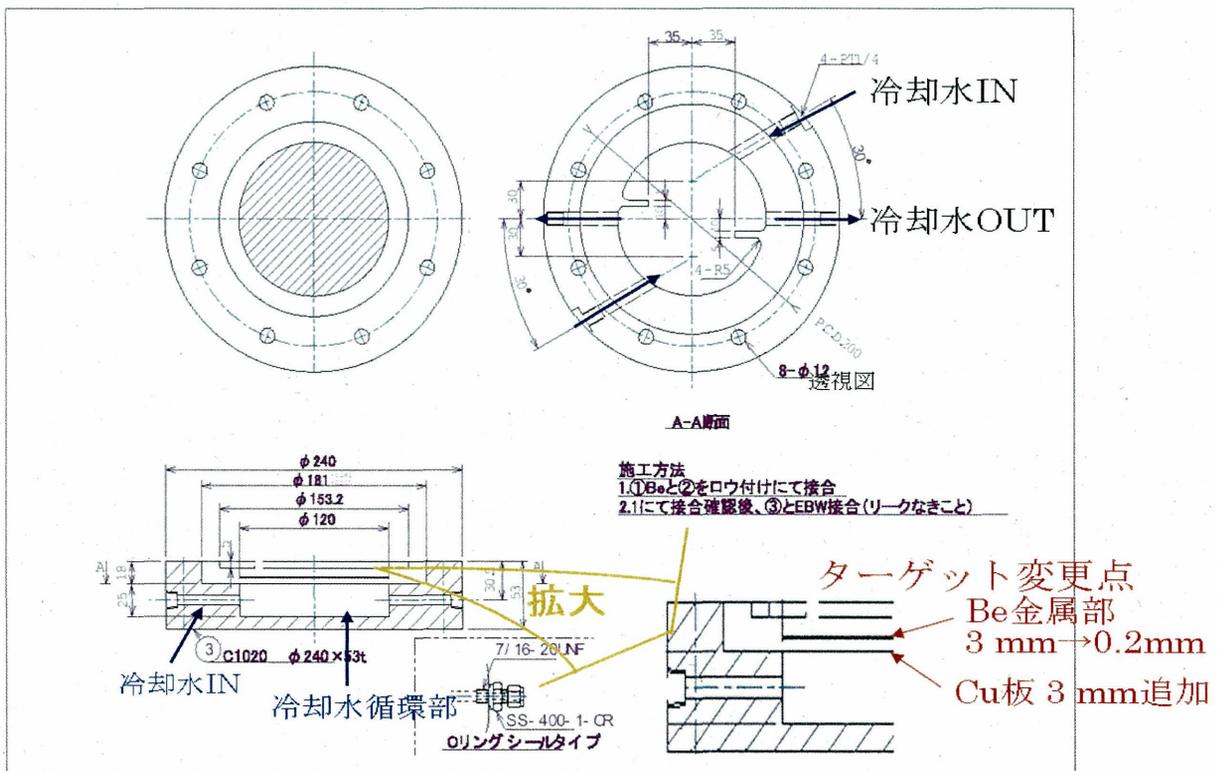


図1. ターゲット構造

2. Be ターゲットの構造

ターゲットの基本素材は冷却効率を考え、熱伝導に優れている Cu (銅) を使用し、加速器からの荷電粒子が当たる部分にのみ、H (水素) や D (重水素) と反応させるための Be (ベリリウム) を付着させている。また、Cu(銅)と Be(ベリリウム)の間には、5～8 N/kg の圧力をかけた水を巡回させており、熱を持ったターゲットを冷却している。冷却用の水は、純水を使用し、イオン交換樹脂とフィルターを使用することによって、水の電気伝導度を抑えている。このため、ターゲット部分は冷却とともに電氣的に絶縁が保たれており、荷電粒子の電荷をターゲット電流として測定するところで、加速器内の荷電粒子量と中性子の発生量を一定にしている。

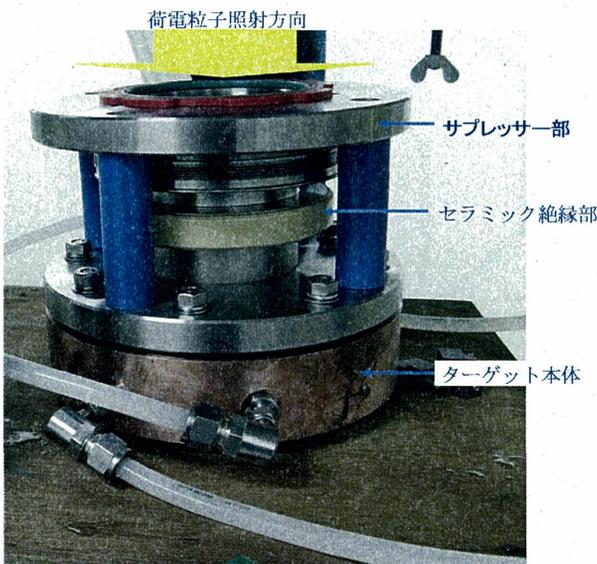


図 2. ターゲットサイドビュー (照射方向は上から照射)

図 1. としてターゲットの構造を表示する。ターゲットは、基本部分は Cu(銅)で作成され、ターゲットの先端部はターゲットに到達した重水素イオン (D^+) の電流を計測するためにセラミックで絶縁されている。また、ターゲット絶縁部の上には更に絶縁部を設けて、ビームがターゲットに当たる際に大量に発生し、ビーム電流計測に影響を及ぼす二次電子が Be

ターゲット方向に流れることを防いでいる。本体写真を図 2.として表示した。この様な技術的要素を入れることによって、ターゲットに当たるビーム電流を正確に測定することができる。この電流値と、照射前の線量率測定で得られる校正値から中性子の発生量が導出される。

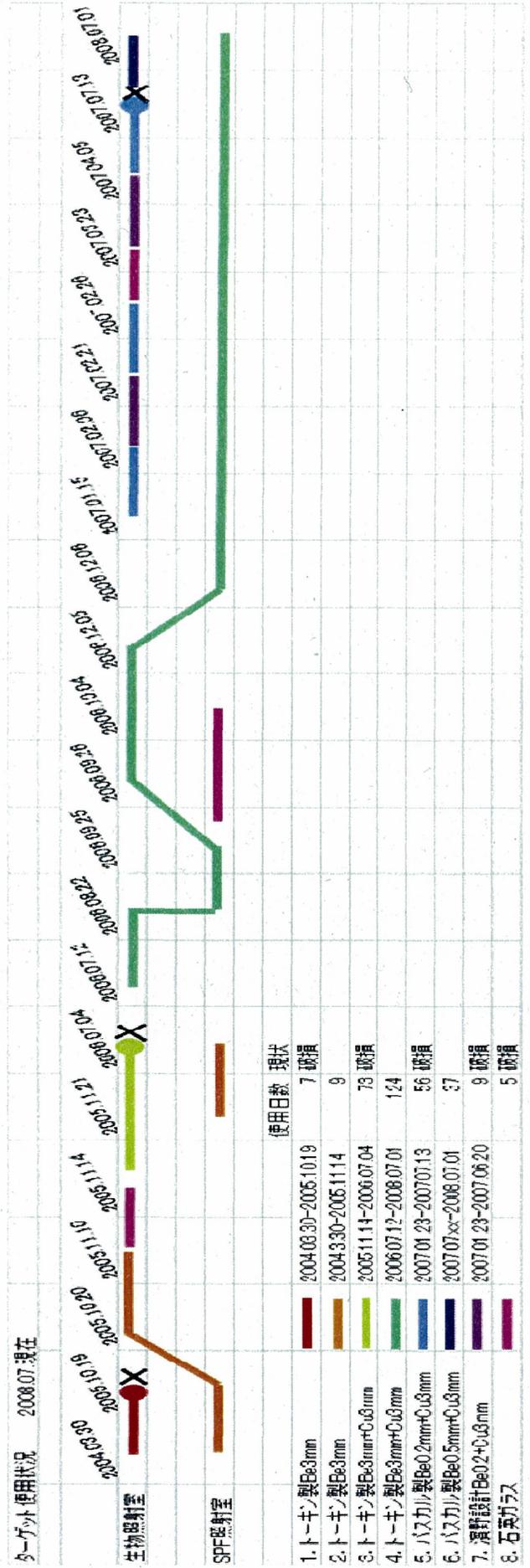
3. ターゲットの使用期間と種類一覧

ターゲットは構造と Be の厚さにより大きく分けて現在 5 種類存在している。①と②に対しては同様の物があり、区別をつけるために表 1 上では「'」を付けて表示した。タイプ①は、NASBEE 導入した際に同時に製作したもので、Be 金属を水で直接冷却する構造であり、現在使用しているターゲット構造と異なる。タイプ②～④が現在の標準型であり、Be 金属が破損しても冷却水が真空中に入らないように、Be と冷却水の上に 3 mm 厚の Cu 板を入れたものである。タイプ⑤はターゲットの製作コストや廃棄量の削減を目指して試作した実験用の小型ターゲットである。ターゲットタイプとそれにより発生する中性子線量率の関係については、ターゲットの種類により異なる。線量率と線質の変動については、ターゲット電流と発生する中性子量は Be の厚さに比例している。詳細については、線量率に関しては当課より報告する予定である。また、中性子の線質に関しては放射線計測技術室より報告される予定である。その使用場所と破損時期を表 2 に示した。

表 1. ターゲットの種類

ターゲット種類	試用期間	使用日数	現状
① Be(厚さ 3 mm)冷却層 25 mm	2004.03.30-2005.10.19	7	破損
①' Be(厚さ 3 mm)冷却層 25 mm	2004.03.30-2005.11.14	9	①のは損により使用中
② Be(厚さ 3 mm)・Cu (厚さ 3 mm) 冷却層 25 mm	2005.11.14-2006.07.04	73	破損
②' Be(厚さ 3 mm)・Cu (厚さ 3 mm) 冷却層 25 mm	2006.07.12-SPF 室にて使用中	124	使用中
③ Be(厚さ 0.2 mm)・Cu (厚さ 3 mm)冷却層 25 mm	2007.01.23-2007.06.20	56	破損
④ Be(厚さ 0.5 mm)・Cu (厚さ 3 mm) 冷却層 25 mm	2007.09.06- 生物室にて使用中	37	使用中
⑤ Be(厚さ 0.2 mm)・Cu (厚さ 3 mm) 冷却層 10 mm	実験用	9	破損

表 2. ターゲット使用場所と試用期間、破損時期一覧表



4. Be ターゲット変更履歴と破損内容

ターゲットの変更履歴と破損内容を a) から e) に示した。



図3. Be(厚さ 3 mm)のみターゲット破損状況
亀裂が入り冷却水が真空中に放出された。



図4. Be(厚さ 3 mm)・Cu(厚さ 3 mm)ターゲット。



図5. Be(厚さ 0.2 m)・Cu(厚さ 3 mm)。

a) タイプ①及び①' (Be厚 : 3 mm)

破損時、真空ダクト内に冷却用の水が流入し真空を悪化させ、真空維持用のポンプにダメージを与えたことから急遽対応版を作成した。破損状況は図3として記載した。

b) タイプ②及び②' (Be厚 : 3 mm, Cu厚 3 mm)

タイプ①の破損を受けて製作。

破損品と正常品があるが、正常な方は現在SPFにて使用中。破損品の状況を図4として記載した。こちらは Be(厚さ 3 mm)板の下に Cu(厚さ 3 mm)を取り付けたため Be板が破損した場合でも冷却用の純水が真空中に漏れ出す心配が無い。詳細は図1 : ターゲット構造の変更点参照。

c) タイプ③ (Be厚 : 0.2 mm, Cu厚 3 mm)

4 MeV 重水素イオンの Be 金属内の飛程計算結果より、Be板の厚さを大幅に変更して 0.2 mm 厚にした。薄くした理由は、それまでのターゲットの破損状況から、Beターゲットの厚さが 3 mm もあるために、ビーム照射面まで十分冷却できておらず、ビーム照射により発生する熱が Be 金属の溶解剥離を引き起こした、と考えたため。最終的にはビーム照射面が溶解剥離したが、生物照射実験のための運用を開始してから、従来のタイプのものより熱耐性は高くなった。このターゲットも破損による冷却水の流入は起こっていない。破損状況を図5にした。

d) タイプ④ (Be厚 : 0.5 mm, Cu厚 3 mm)
生物照射室で使用中。

e) タイプ⑤ (実験用 Be厚さ : 0.2 mm, Cu厚 : 3 mm)

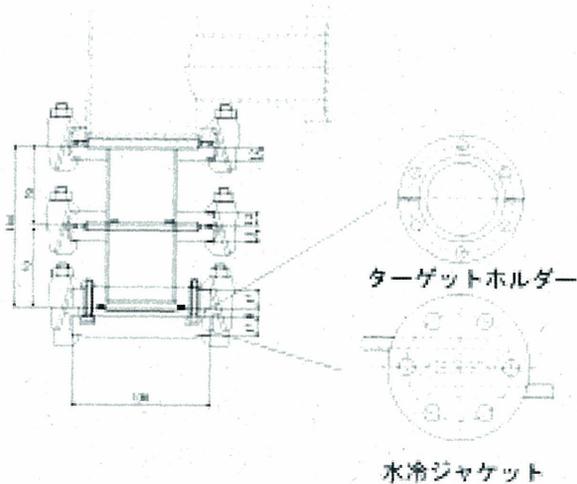


図 6. 実験用 Be (厚さ 0.2 mm)・Cu (厚さ 3 mm)。冷却部取り外し可能型ターゲット。

これは冷却部分が取り外せるようになっており、水の影響が無いときの中性子のエネルギースペクトル等を確認するために製作した。ターゲットの構造を図 6 に示した。このターゲットも最終的には破損したが、その原因は、ターゲット面積が小さいことからワブリング法を用いなかったためである。数 10 μ A 程度の低電流ビーム照射であったものの、ターゲットの一部にのみ熱が集中してしまったことと、冷却が不十分だったことが溶解剥離を誘起したと考えられる。破損状況を図 7 に示した。



図 7. 実験用 Be(厚さ 0.2 mm)・Cu(厚さ 3 mm)。

ここで、ターゲットの冷却を担うチラー(アクアテック社製の AQA-K8P-AW) の冷却能力について検討した。性能については、表 3 に示した[2]。

表 3 : 冷却器仕様

冷却装置	アクアテック社製	
型式	QA-K8P-AW-TK	
循環水圧力		0.53 MPa
流量		60 L / min
冷却能力	6.5 KW	at20°C
奪えるカロリー数		5590 cal/h

加速器運転時 (ビームエネルギー 4 MeV、ターゲット電流 400 μ A 時) ターゲット部における発熱量を以下のように計算した。

$$4 \text{ MV} \times 400 \mu\text{A} = 1600 \text{ W となり}$$

$$1600 \text{ W} \times 1 \text{ s} = 1600 \text{ J に換算すると}$$

$$1 \text{ J} = 0.239 \text{ cal となり、}$$

$$1600 \times 0.239 = 382.4 \text{ cal と計算される。}$$

単位を時間あたりの照射量の熱量に単位を合わせると、

$$1 \text{ h} = 3600 \text{ s} \quad 382.4 \text{ cal} \times 3600 = 1376640 \text{ cal/h}$$

となる。

ここでは、荷電粒子が Be 金属の分子結合に及ぼすダメージについては考慮していない。次回ターゲット設計時には、理論計算を基にして設計する必要があると考えている。

5. まとめ

今までのターゲット使用状況により、ターゲットで使用している Be 金属は最大加速電流で使用している時のみ破損しているのではなく、比較的 low 加速電流で使用しているときでも破損している事が分かった。そして、同時期に同一の設計で製作されたターゲットであっても著しい使用時間の隔たりがあることも判明した。また、放射線生物影響リスク評価において必要とされる単色性の高い中性子線の照射場実現のためには、中性子の遮蔽体にも使用されている物質である水が中性子発生部の直下に 25 mm ある事も問題である。単色性の高い中性子線を維持しようとする場合、できるだけ水の冷却部を薄くする事で、中性

子線のエネルギーばらつきを抑えることが考えられる。現状のターゲットの破損履歴を更に詳細に分析した上で新たなターゲットの開発に着手する予定である。

参考文献

- [1]須田充、萩原拓也、酢屋徳啓、濱野毅、高田真志、小西輝昭、今関等、中性子照射用加速器システム (NASBEE)、放射線医学総合研究所技術報告書 (NIRS Technology)、2(2008) *this issue*.
- [2]アクアテック株式会社、取扱説明書 空冷野外設置型冷却水循環装置 型式 AQA-K8P-AW-TK(2004)39

付属資料編

研究の基盤を支えている人達の活動の状況をより良く理解してもらう材料の一つとして、個人の業務実績を収録しました。

出典は、所内の「業務実績登録システム」からで、主に今中期計画開始からの実績を収録しました。なお、本稿は、編集担当の独断で今回の原稿を投稿してくれた人を中心に、作成したもので、内容等に誤りあれば、全て編集担当の責任です。

(問い合わせ先)nirstech@nirs.go.jp

基盤技術センター 研究基盤技術部 技術報告書編集担当
編集担当： 酢屋 徳啓、小西 輝昭、安田 仲宏、今関 等

付録

技術報告書著者の業務実績

(順不同)

原著論文

Shino Homma-Takeda, Yoshikazu Nishimura, Hiroyuki Iso, Takahiro Ishikawa, Hitoshi Imaseki, Masae Yukawa, A new approach for standard preparation in microbeam analysis: Development and validation, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, *accepted*

Shino Homma-Takeda, Miyuki Inoue, Shunji Ueno, Hiroyuki Iso, Takahiro Ishikawa, Yoshikazu Nishimura, Hitoshi Imaseki, Masae Yukawa, Yoshiya Shimada, Elemental imaging in pancreas of immature rats by micro PIXE analysis, *International Journal of PIXE*, *accepted*

Tsuyoshi Yoshimura, Noriko Kagemori, Junji Sugiyama, Shuichi Kawai, Kouichirou Sera, Syouji Futatsugawa, Masae Yukawa, Hitoshi Imaseki, Elemental analysis of Worker Mandibles of *Coptotermes formosanus* (Isoptera: Rhinotermitidae), *Sociobiology*, 45(2008)255-259

Kurt Hafer, Teruaki Konishi, Schiestl Robert, Radiation-induced long-lived extracellular radicals do not contribute to measurement of intracellular reactive oxygen species using the dichlorofluorescein method, *Radiation Research*, 169(2008) 469-473

Yuuji Ishikawa, Takako Yasuda, Takahiro Kage, Shigeo Takashima, Masami Yoshimoto, Naoyuki Yamamoto, Kouichi Maruyama, Hiroyuki Takeda, Hironobu Itou, Early development of the cerebellum in teleost fishes: A study based on gene expression patterns and histology in the medaka embryo, *Zoological Science*, 25(2008) 407-418

Yoshiyuki Iwata, Satoru Yamada, Takeshi Murakami, Tetsuya Fujimoto, Takashi Fujisawa, Hirotsugu Ogawa, Nobuyuki Miyahara, Kazuo Yamamoto, Satoru Houjou, Yukio Sakamoto, Masayuki Muramatsu, Takeshi Takeuchi, et. al., Effects of voltage errors caused by gap-voltage and automatic-frequency tuning in an alternating-phase-focused linac, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B*, 226(2008) 2150-2156

Aya Saito, Hirofumi Yamauchi, Yuka Ishida, Yasushi Ohmachi, Hiroyuki Nakayama, et.al., Cerebellar vermis defect induced by prenatal gamma-ray irradiation in radiosensitive BALB/c mouse. *Histology and Histopathology*, 23(2008) 953-964

Michael Hajek, Thomas Berger, Norbert Vana, Yukio Uchihori, Nakahiro Yasuda, Hisashi Kitamura, et.al., LET dependence of thermoluminescent efficiency and peak height ratio of CaF₂:Tm, *Radiation Measurements*, 43(2008) 1135-1139

Tomoya Yamauchi, Yutaka Mori, Keiji Oda, Nakahiro Yasuda, Hisashi Kitamura, Remi Barillon, Structural Modification along Heavy Ion Tracks in Poly(allyl diglycol carbonate) Films, *Japanese Journal of Applied Physics*, 47(2008)3606-3609

Wakako Ohmura, Youki Suzuki, Hitoshi Imaseki, Takahiro Ishikawa, Hiroyuki Iso, Tsuyoshi Yoshimura, Yoko Takematsu, PIXE Analysis on predominant elemental accumulation on the mandible of various termites, *International Journal of PIXE*, 17(2007)113-118

Katsumi Saitoh, Tsuyoshi Hamano, Hiroyuki Iso, Takahiro Ishikawa, Hitoshi Imaseki, Elemental analysis of atmospheric particles collected on polytetrafluoroethylene (PTFE) filter using in-air helium ion induced X-ray emission method, *International Journal of PIXE*, 17(2007)143-149

中村 秀仁、江尻 宏泰、今関 等、北村 尚、内堀 幸夫、その他、Multilayer Scintillator Responses for Mo Observatory of Neutrino Experiment Studied Using a Prototype Detector MOON-1, *Journal of the Physical Society of Japan*, 76(2007)114201-1-114201-9

Wakako Ohmura, Hiroshi Matsunaga, Tsuyoshi Yoshimura, Youki Suzuki, Hitoshi Imaseki, Zinc Distribution on the Mandible Cutting Edges of Two Drywood Termites, *Incisitermes minor* and *Cryptotermes domesticus* (Isoptera:Kalotermitidae), *Sociobiology*, 50(2007)1035-1040

Hitoshi Imaseki, Takahiro Ishikawa, Hiroyuki Iso, Teruaki Konishi, Noriyoshi Suya, Tsuyoshi Hamano, Xufei Wang, Nakahiro Yasuda, Masae Yukawa, Progress report of the single particle irradiation system to cell (SPICE), *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B*, 260(2007)81-84

Masae Yukawa, Kazuko Aoki, Hiroyuki Iso, Kumiko Kodama, Hitoshi Imaseki, Yuuji Ishikawa, Determination of the metal balance shift induced in small fresh water fish by X-ray irradiation using PIXE analysis, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 272(2007)345-352

小西 輝昭、竹安 明浩、雨宮 邦招、夏目 敏之、安田 伸宏、檜枝 光太郎、細胞核内 DNA 二本鎖切断部位の蛍光標識によるイオントラックの可視化。放射線、33(2007)201-210

Teruaki Konishi, Kuniaki Amemiya, Toshiyuki Natsume, Akihiro Takeyasu, Nakahiro Yasuda, Yoshiya Furusawa, Kotaro Hieda, A New Method for the Simultaneous Detection of Mammalian Cells and Ion Tracks on a Surface of CR-39, *Journal of Radiation Research*, 48(2007)255-261

Kouji Noda, Takuji Furukawa, Takashi Fujisawa, Yoshiyuki Iwata, Tatsuaki Kanai, Mitsutaka Kanazawa, Atsushi Kitagawa, Masataka Komori, Shinichi Minohara, Takeshi Murakami, Masayuki Muramatsu, Shinji Satou, Yuka Takei, Mutsumi Tashiro, Masami Torikoshi, Satoru Yamada, Ken Yusa, New Accelerator Facility for Carbon-Ion Cancer-Therapy, *Journal of Radiation Research*, 48(2007)A43-A54

T Fujii, Takeshi Yokoyama, Osamu Ninagi, Hirokazu Kakehashi, Yoshiaki Obara, Mitsuru Neno, Takahiro Ishikawa, Kazuei Mita, Toru Shimada, Hiroaki Abe, Isolation and characterization of sex chromosome rearrangements generating male muscle dystrophy and female abnormal oogenesis in the silkworm, *Bombyx mori*, *Genetica*, 130(2007)267-280

Yuuji Ishikawa, Takako Yasuda, Keiko Maeda, Atsuko Matsumoto, Kouichi Maruyama, Apoptosis in neural tube during normal development of medaka, *The Fish Biology Journal Medaka*, 11(2007)23-30

Yuuji Ishikawa, Naoyuki Yamamoto, Masami Yoshimoto, Takako Yasuda, Kouichi Maruyama, Takahiro Kage, Hiroyuki Takeda, Hironobu Itou, Developmental Origin of Diencephalic Sensory Relay Nuclei in Teleosts, *Brain, Behavior and Evolution*, 69(2007)87-95

Yoshiyuki Iwata, Satoru Yamada, Takeshi Murakami, Tetsuya Fujimoto, Takashi Fujisawa, Hirotosugu Ogawa, Nobuyuki Miyahara, Kazuo Yamamoto, Satoru Houjou, Yukio Sakamoto, Masayuki Muramatsu, Takeshi Takeuchi, et.al., Performance of a compact injector for heavy-ion medical accelerators, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A*, 572(2007)1007-1021

Junko Hiraga, Shogo Nakamura, Yoshihiro Uchida, Masato Kikuchi, Shingo Kurata, Yuichi Ozaki, Shintaro Kamada, Takeshi Takashima, Yukio Uchihori, Hisashi Kitamura, Hiroko Tawara, A novel multi-collimator using BP-1 glass and an application for X-ray CCDs, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A*, 573(2007)236-239

David Sylvain Broggio, Remi Barillon, Jean Marc Jung, Nakahiro Yasuda, Tomoya Yamauchi, Hisashi Kitamura, et.al., Polyvinyltoluene scintillators for relative ion dosimetry: An investigation with Helium, Carbon and Neon beams, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B*, 254(2007)3-9

Maki Okada, Atsushi Okabe, Yukio Uchihori, Hisashi Kitamura, Eimiko Sekine, Satoru Ebisawa, Masao Suzuki, Ryuichi Okayasu, Single extreme low dose/low dose rate irradiation causes alteration in lifespan and genome instability in primary human cells, *British Journal of Cancer*, 96(2007)1707-1710

Tsutomu Nagayoshi, Tadayoshi Doke, Yasunobu Fujita, Kaori Hattori, Koji Ishida, Jun Kikuchi, Hisashi Kitamura, Tatsuto Komiyama, Hidetoshi Kubo, Haruhisa Matsumoto, Kentaro Miuchi, Nishimura Hironobu, Kiwamu Saitou, Shin-ichi Sasaki, Hiroyuki Sekiya, Atsushi Takada, Toru Tanimori, Kazuhiro Terasawa, Hiroko Tawara, Yukio Uchihori, Kazuki Ueno, Response of a Micro Pixel Chamber to heavy ions with the energy of several hundreds of MeV/n, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A, 581(2007)110-114

Kinya Hibino, Toshisuke Kashiwagi, Syouji Okuno, Kaori Yajima, Yukio Uchihori, Hisashi Kitamura, Takeshi Takashima, Mamoru Yokota, Kenji Yoshida, The design of diamond Compton telescope, Astrophysics and Space Science, 309(2007)541-544

Katsumi Saitoh, Kouichirou Sera, Hitoshi Imaseki, M Shinohara, Masahiko Fujiwara, PIXE analysis of spot samples on new type of PTFE ultra-membrane filter-tape mounted in an automated beta-ray absorption mass monitor, International Journal of PIXE, 16(2006)95-101

今関 等、液滴 P I X E 分析装置の開発。放射線化学、82(2006)24-35

Atsushi Kitagawa, Yoshiya Furusawa, Tatsuaki Kanai, Mitsutaka Kanazawa, Hideyuki Mizuno, Masayuki Muramatsu, Shinji Satou, Mitsuru Suda, Takehiro Tomitani, Eriko Urakabe, Mitsuo Yoshimoto, Qiang Li, Katsushi Hanawa, Yasushi Iseki, Kohsuke Sato, Medical application of radioactive nuclear beams at HIMAC, Review of Scientific Instruments, 77(2006)03C105-1-03C105-3

Toshihiro Honma, Satoru Houjou, Yukio Sakamoto, Masayuki Muramatsu, Nobuyuki Miyahara, Satoru Yamada, et.al., Low-energy ion decelerator for an external injection line at the NIRS-930 cyclotron, Review of Scientific Instruments, 77(2006)03B909-1-03B909-3

Sandor Biri, Atsushi Kitagawa, Masayuki Muramatsu, et.al., Fullerenes in electron cyclotron resonance ion sources, Review of Scientific Instruments, 77(2006)03A314-1-03A314-3

Arne Drentje, Masayuki Muramatsu, Atsushi Kitagawa, Optimizing C4+ and C5+ beams of the Kei2 electron cyclotron resonance ion source using a special gas-mixing technique, Review of Scientific Instruments, 77(2006)03B701-1-03B701-3

Yuka Ishida, Yasushi Ohmachi, Yukiko Nakata, Takeshi Hiraoka, Tsuyoshi Hamano, Shinji Fushiki, Toshiaki Ogiu, Dose-Response and Large Relative Biological Effectiveness of Fast Neutrons with Regard to Mouse Fetal Cerebral Neuron Apoptosis, Journal of Radiation Research, 47(2006)41-47

Takako Yasuda, Kazuko Aoki, Atsuko Matsumoto, Kouichi Maruyama, Yasuko Taguchi, Shinji Fushiki, Yuuji Ishikawa, Radiation-Induced Brain Cell Death Can Be Observed in Living Medaka Embryos, *Journal of Radiation Research*, 47(2006)295-303

Kouji Noda, Takuji Furukawa, Yoshiyuki Iwata, Tatsuaki Kanai, Mitsutaka Kanazawa, Nobuyuki Kanematsu, Atsushi Kitagawa, Masataka Komori, Shinichi Minohara, Masayuki Muramatsu, Takeshi Murakami, Shinji Satou, Yukio Satou, Shinji Shibuya, Masami Torikoshi, Satoru Yamada, Design of carbon therapy facility based on 10 years experience at HIMAC, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A*, 562(2006)1038-1041

Yoshiyuki Iwata, Satoru Yamada, Takeshi Murakami, Tetsuya Fujimoto, Takashi Fujisawa, Hiroyuki Ogawa, Nobuyuki Miyahara, Kazuo Yamamoto, Satoru Houjou, Yukio Sakamoto, Masayuki Muramatsu, et.al., Alternating-phase-focused IH-DTL for an injector of heavy-ion medical accelerators, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A*, 569(2006)685-696

Syoji Torii, Tadahisa Tamura, Kenji Yoshida, Hisashi Kitamura, Yusaku Katayose, et.al., High energy electron observation by Polar Patrol Balloon flight in Antarctica, *Advances in Polar Upper Atmosphere Research*, 20(2006) 52-62

Toshisuke Kashiwagi, Kinya Hibino, Hisashi Kitamura, Syouji Okuno, Takeshi Takashima, Yukio Uchihori, Kaori Yajima, Mamoru Yokota, Kenji Yoshida, et.al., Investigation of basic characteristics of synthetic diamond radiation detectors, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 53(2006)630-635

Eduardo Yukihiro, Gabriel Oliveira Sawakuchi, Eric Benton, Nakahiro Yasuda, Yukio Uchihori, Hisashi Kitamura, et.al., Application of the optically stimulated luminescence (OSL) technique in space dosimetry, *Radiation Measurements*, 41(2006)1126-1135

鳥居 祥二、田村 忠久、吉田 賢二、北村 尚、その他、南極周回気球による高エネルギー電子の観測。大気球研究報告 (宇宙航空研究開発機構研究開発報告 ; JAXA-RR)、05(2006) 57-83

Nakahiro Yasuda, Yukio Uchihori, Eric Benton, Hisashi Kitamura, Kazunobu Fujitaka., The InterComparison of Cosmic rays with Heavy Ion Beams at NIRS (ICCHIBAN) project, *Radiation Protection Dosimetry*, 120(2006)414-420

Hitoshi Imaseki, Keizo Ishii, Takahiro Ishikawa, Hiroyuki Iso, Takayuki Shinomiya, Tsuyoshi Hamano, Masae Yukawa, Development of Droplet-PIXE System for Environmental Monitoring Samples, *International Journal of PIXE*, 15(2005) 293-299

Shigeo Matsuyama, Keizo Ishii, Hiromichi Yamazaki, Y Kikuchi, TS Amartaivan, S Abe, K Inomata, Y Watanabe, A Ishizaki, R Oyama, Y Kawamura, A Suzuki, G Momose, T Yamaguchi, Hitoshi Imaseki, Microbeam Analysis of Single Aerosol Particles at Tohoku University, *International Journal of PIXE*, 15(2005)257-262

Shigeo Matsuyama, Keizo Ishii, S Abe, H Ohtu, Hiromichi Yamazaki, Y Kikuchi, TS Amartaivan, K Inomata, Y Watanabe, A Ishizaki, Y Barbotteau, A Suzuki, T Yamaguchi, G Momose, Hitoshi Imaseki, Microbeam Analysis at Tohoku University for Biological Studies, International Journal of PIXE, 15(2005)41-45

Masae Yukawa, Hiroyuki Iso, Kumiko Kodama, Hitoshi Imaseki, Kazuko Aoki, Yuuji Ishikawa, Metal Balance Shift Induced in Small Fresh Water Fish by Several Environmental Stresses, International Journal of PIXE, 15(2005) 203-210

濱野 毅、安田 仲宏、今関 等、湯川 雅枝、古澤 佳也、鈴木 雅雄、松本 健一、バイスタンダー効果と放医研 SPICE 計画。放射線、31(2005)15-23

安田 仲宏、内堀 幸夫、北村 尚、藤高 和信、国際宇宙放射線モニタ比較実験と新しい固体飛跡検出法の開発。放射線、31(2005)119-128

Hiroshi Yamaguchi, Yukio Uchihori, Nakahiro Yasuda, Masashi Takada, Hisashi Kitamura, Estimation of Yields of OH Radicals in Water Irradiated by Ionizing Radiation, Journal of Radiation Research, 46(2005)333-341

Teruaki Konishi, Akihiro Takeyasu, Nakahiro Yasuda, Toshiyuki Natsume, Hiroshi Nakajima, Kenichi Matsumoto, Yukio Satou, Yoshiya Furusawa, Kotaro Hieda, Number of Fe Ion Traversals Through a Cell Nucleus for Mammalian Cell Inactivation Near the Bragg Peak, Journal of Radiation Research, 46(2005)415-424

Kuniaki Amemiya, Hiroyuki Takahashi, Masaharu Nakazawa, Yoshinobu Nakagawa, Toshikazu Majima, Toru Kobayashi, Teruaki Konishi, Kotaro Hieda, Nakahiro Yasuda, Kouichi Ogura, et.al., High-resolution nuclear track mapping in detailed cellular histology using CR-39 with the contact microscopy technique, Radiation Measurements, 40(2005)283-288

Nakahiro Yasuda, Teruaki Konishi, Kenichi Matsumoto, Tomoya Yamauchi, Taku Asuka, Yoshiya Furusawa, Yukio Satou, Keiji Oda, Hiroko Tawara, Kotaro Hieda, Dose distribution of carbon ions in air assessed using the imaging plates and ionization chamber, Radiation Measurements, 40(2005)384-388

Teruaki Konishi, Akihiro Takeyasu, Nakahiro Yasuda, Sachi Ishizawa, Hiroshi Nakajima, Takayuki Fujisaki, Yoshiya Furusawa, Yukio Satou, Kotaro Hieda, Irradiation system of ions (H-Xe) for biological studies near the Bragg peak, Review of Scientific Instruments, 76(2005)1-6

Shinji Satou, Atsushi Kitagawa, Mitsutaka Kanazawa, Eriko Urakabe, Takehiro Tomitani, Mitsuru Suda, Qiang Li, Taku Inaniwa, Katsushi Hanawa, Kohsuke Sato, A versatile control system for irradiation and measurement for secondary beam experiments in a heavy ion accelerator, HIMAC, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B, 240(2005)95-99

Atsushi Kitagawa, Masayuki Muramatsu, Shinji Satou, Mitsuru Suda, Kouji Noda, Tatsuaki Kanai, New medical irradiation technique by the permanent magnet system for the heavy-ion therapy, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B, 240(2005)79-82

Akira Fujimori, Ryuichi Okayasu, Hiroshi Ishihara, Satoshi Yoshida, Kiyomi Eguchi-Kasai, Kumie Nojima, Satoru Ebisawa, Sentaro Takahashi, Extremely Low Dose Ionizing Radiation Up-regulates CXC Chemokines in Normal Human Fibroblasts, Cancer Research, 65(2005)10159-10163

Masao Suzuki, Chizuru Tsuruoka, Yukio Uchihori, Satoru Ebisawa, Hiroshi Yasuda, Kazunobu Fujitaka, Reduction in life span of normal human fibroblasts exposed to very low-dose-rate charged particles, Radiation Research, 164(2005) 505-508

Kazuhiro Terasawa, Tadayoshi Doke, Tetsuhito Fuse, Hisashi Kitamura, Yukio Uchihori, et.al., The Response of the silicon-based Linear Energy Transfer Spectrometer (RRMD-III) to Protons from 1 to 70 MeV, Japanese Journal of Applied Physics, 44(2005)7608-7613

Kazunobu Fujitaka, Masaharu Okano, Yukio Uchihori, Hisashi Kitamura, Cosmic radiation at aircraft altitudes calculated by CARI-6 and its comparison with measurements, The Natural Radiation Environment VII : Seventh International Symposium on the Natural Radiation Environment (NRE-VII) Rhodes, Greece, 20-24 May 2002, Radioactivity in the Environment, 7(2005)858-862

口頭発表

鈴木 雅雄、古澤 佳也、鶴岡 千鶴、安田 仲宏、小西 輝昭、濱野 毅、石川 剛弘、磯 浩之、酢屋 徳啓、笠井 清美、今関 等、陽子線マイクロビームを利用した細胞照射実験の試み。第1回共用施設(PASTA&SPICE)共同研究成果報告会(第2回静電加速器利用ワークショップ)、千葉市、2008

斉藤 勝美、濱野 毅、磯 浩之、石川 剛弘、今関 等、PTFE フィルター上に捕集した大気粒子の気中 He イオン照射 PIXE 法による元素分析。第1回共用施設(PASTA&SPICE)共同研究成果報告会(第2回静電加速器利用ワークショップ)、千葉市、2008

小西 輝昭、石川 剛弘、磯 浩之、濱野 毅、安田 仲宏、酢屋 徳啓、児玉 久美子、北村 尚、今関 等、放医研のマイクロビーム細胞照射装置 SPICE について。第1回共用施設(PASTA&SPICE)共同研究成果報告会(第2回静電加速器利用ワークショップ)、千葉市、2008

石川 剛弘、放医研の PIXE 分析用加速器システム (PASTA) について。第1回共用施設(PASTA&SPICE)共同研究成果報告会(第2回静電加速器利用ワークショップ)、千葉市、2008

今関 等、石川 剛弘、磯 浩之、濱野 毅、酢屋 徳啓、小西 輝昭、前田 武、液滴 PIXE 分析装置 Droplet PIXE II の開発 その1。第3回技術と安全の報告会、千葉市、2008

濱野 毅、石川 剛弘、磯 浩之、小西 輝昭、酢屋 徳啓、今関 等、高野 光司、高野 佳子、新偏向電磁石によるマイクロビームサイズ向上の検証。第3回技術と安全の報告会、千葉市、2008

前田 武、小西 輝昭、高野 裕之、児玉 久美子、Hafer Kurt、高感度・高速細胞分取装置 FACS Aria の精度維持管理法の確立。第3回技術と安全の報告会、千葉市、2008

斉藤 勝美、石川 剛弘、磯 浩之、今関 等、その他、気中 He イオン照射 PIXE を用いたエンジンオイル含有元素分析手法の開発。第3回技術と安全の報告会、千葉市、2008

水野 和恵、遊佐 訓孝、濱野 毅、小西 輝昭、磯 浩之、石川 剛弘、加藤 宝光、今関 等、岡安 隆一、上坂 充、治療型 X 線 DDS の PIXE 分析。第95回日本医学物理学会学術大会、横浜市、2008

前田 武、今関 等、万年 WEB カレンダーの作成と応用。第3回情報技術研究会、福岡県飯塚市、2008

水野 和恵、森 梓、遊佐 訓孝、小西 輝昭、濱野 毅、石川 剛弘、磯 浩之、加藤 宝光、岡安 隆一、今関 等、上坂 充、X 線薬品送達システムの in vitro 薬剤取込み評価。日本原子力学会関東・甲越支部第1回学生研究発表討論会、日本、2008

水野 和恵、森 梓、遊佐 訓孝、小西 輝昭、濱野 毅、石川 剛弘、磯 浩之、今関 等、上坂 充、PIXE による X 線 DDS の細胞取り込み分析。第 9 回化学放射線治療科学研究会、東京、2008

鈴木 雅雄、鶴岡 千鶴、安田 仲宏、小西 輝昭、北村 尚、炭素イオンで誘発されるバイスタンダー細胞致死効果のヒト正常細胞とがん細胞の違い。第 38 回放射線による制癌シンポジウム、第 47 回日本医学放射線学会生物部会学術大会、高知市、2008

Kotaro Hieda, Teruaki Konishi, Biological effects of heavy ion near the Bragg peak, 10th International Workshop on Radiation Damage to DNA, Urabandai, 2008

小西 輝昭、低エネルギーイオンを用いたイオン特異的生物効果の研究。第 9 回化学放射線治療科学研究会、千葉市、2008

Satoshi Yoshida, Nobuyoshi Ishii, Yuuji Ishikawa, Isao Kawaguchi, Yoshihisa Kubota, Keiko Tagami, Hiroshi Takeda, Masahiro Doi, Taizo Nakamori, Tadaaki Ban-nai, Akira Fujimori, Shoichi Fuma, Kouichi Maruyama, Takako Yasuda, Kei Yanagisawa, Kiriko Miyamoto, Yoshito Watanabe, Researches in National Institute of Radiological Sciences (NIRS) for radiation protection of non-human biota and ecosystems in Japanese environment, International Conference on Radioecology & Environmental Radioactivity, Bergen, 2008

中村 秀仁、江尻 宏泰、北村 尚、内堀 幸夫、辻 厚至、その他、次世代ガン診断用低エネルギー領域ガンマ線検出器 CROSS 計画。日本保健物理学会第 42 回研究発表会、沖縄県宜野湾市、2008

Nakahiro Yasuda, Jadrnickova Iva, Yukio Uchihori, Hisashi Kitamura, Mieko Kurano, Hajime Kawashima, et.al., Intercomparison of passive radiation monitors in Russian segment of ISS(BRADOS/Space Intercomparison 1), AOGS 2008, 5th Annual General Meeting, Korea, 釜山, 2008

玉川 徹、安田 仲宏、北村 尚、その他、ガス電子増幅フォイルの宇宙利用に向けた重イオン照射実験。日本天文学会春季年会、東京、2008

玉川 徹、安田 仲宏、北村 尚、その他、Thick-foil GEM のゲイン変動と放電率調査。日本物理学会第 63 回年次大会、大阪、2008

Masao Suzuki, Yukio Uchihori, Hisashi Kitamura, Chizuru Tsuruoka, Ryuichi Okayasu, Radiation-quality dependence of genomic instability in mutation induced by the pre-treatment with low-fluence heavy ions, Heavy Ion Research Joint Meeting, USA, Houston, Texas, 2008

湯川 雅枝、丸山 耕一、磯 浩之、青木 一子、石川 裕二、今関 等、ストレス負荷メダカの臓器中微量元素分析(第 4 報) -X 線照射メダカの血液-。第 24 回 P I X E シンポジウム、東京都多摩市、2007

柳沼 尚紀、吉富 友恭、武田 志乃、石川 剛弘、磯 浩之、今関 等、イトウの回遊履歴の解明に関する硬組織微量元素分析の検討。第 24 回 P I X E シンポジウム、東京都多摩市、2007

鈴木 享子、吉富 友恭、河口 洋一、武田 志乃、石川 剛弘、磯 浩之、今関 等、イトウの回遊履歴の解明に関する硬組織微量元素分析の検討。第 24 回 P I X E シンポジウム、東京都多摩市、2007

濱野 毅、石川 剛弘、磯 浩之、小西 輝昭、酢屋 徳啓、今関 等、高野 光司、高野 佳子、マイクロビーム細胞照射装置マグネットシステムの改造と効果。第 24 回 P I X E シンポジウム、東京都多摩市、2007

石川 剛弘、磯 浩之、小西 輝昭、濱野 毅、今関 等、建屋構造材元素分析の試み。第 24 回 P I X E シンポジウム、東京都多摩市、2007

石川 剛弘、磯 浩之、小西 輝昭、酢屋 徳啓、濱野 毅、今関 等、液滴 PIXE 分析装置 Droplet PIXE の開発その 1。第 24 回 P I X E シンポジウム、東京都多摩市、2007

武田(本間)志乃、磯 浩之、石川 剛弘、井上 美幸、上野 俊治、西村 義一、今関 等、湯川 雅枝、島田 義也、幼若ラット膵臓におけるマイクロ PIXE による元素イメージング 1。第 24 回 P I X E シンポジウム、東京都多摩市、2007

小西 輝昭、安田 伸宏、石川 剛弘、磯 浩之、濱野 毅、酢屋 徳啓、大熊 俊介、児玉 久美子、檜枝 光太郎、今関 等、放医研 SPICE の現状 2. 試料周辺装置。フォトンファクトリー研究会「マイクロビーム細胞照射装置を用いた放射線に対する細胞応答に関するワークショップ」、つくば市、2007

濱野 毅、石川 剛弘、磯 浩之、小西 輝昭、酢屋 徳啓、安田 伸宏、今関 等、放医研 SPICE におけるビーム偏向・収束系の改造。第 20 回タンデム加速器およびその周辺技術の研究会、茨城県那珂郡東海村、2007

石川 剛弘、磯 浩之、小西 輝昭、北村 尚、濱野 毅、今関 等、PIXE 分析法におけるビーム電流リアルタイム測定システムの開発。第 2 回技術と安全の報告会、千葉市、2007

小西 輝昭、児玉 久美子、大熊 俊介、磯 浩之、石川 剛弘、安田 伸宏、檜枝 光太郎、今関 等、SPICE マイクロビーム照射装置を用いた生物実験のための細胞試料作成法。第 2 回技術と安全の報告会、千葉市、2007

石川 裕二、保田 隆子、メダカ胚に対する X 線照射の非致命的影響。第 2 回放射線防護研究センターシンポジウム、千葉、2007

Yuuji Ishikawa, Takako Yasuda, Takahiro Kage, Naoyuki Yamamoto, Masami Yoshimoto, Hiroyuki Takeda, Hironobu Ito, Morphogenesis of the cerebellum in teleost fish, The J.B. Johnston Club, USA, San Diego, 2007

小西 輝昭、大熊 俊介、安田 仲宏、古澤 佳也、今関 等、檜枝 光太郎、ブラッグピーク近傍の重粒子イオンを用いたイオン特異的なDNA損傷の誘発と修復。H18 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会、千葉市、2007

鈴木 雅雄、鶴岡 千鶴、安田 仲宏、小西 輝昭、北村 尚、炭素イオンと鉄イオンで誘導される生物効果のバイスタンダー効果の違い。宇宙生物科学会第 21 回大会、東京、2007

鈴木 雅雄、古澤 佳也、取越 正己、大野 由美子、鶴岡 千鶴、八木 直人、梅谷 啓二、小西 輝昭、小山田 敏文、夏堀 雅宏、放射光X線スリット状マイクロビームによるヒト培養細胞の致死効果。第 46 回日本医学放射線学会生物部会学術大会、茨城県つくば市、2007

吉田 聡、石井 伸昌、石川 裕二、川口 勇生、久保田 善久、田上 恵子、武田 洋、土居 雅広、中森 泰三、坂内 忠明、藤森 亮、府馬 正一、丸山 耕一、保田 隆子、柳澤 啓、宮本 霧子、渡辺 嘉人、ヒト以外の生物種と生態系の放射線防護 —放医研の取り組み—。日本放射線影響学会第 50 回大会、千葉市、2007

鈴木 雅雄、鶴岡 千鶴、内堀 幸夫、北村 尚、粒子放射線低フルエンス照射によって誘導される突然変異誘発効果の増強とバイスタンダー効果。日本放射線影響学会第 50 回大会、千葉市、2007

岡安 隆一、岡田 真希、岡部 篤史、関根 絵美子、内堀 幸夫、北村 尚、鈴木 雅雄、極低線量・低線量率重粒子線 1 回照射による細胞老化およびゲノム不安定性。日本放射線影響学会第 50 回大会、千葉市、2007

磯 浩之、小西 輝昭、石川 剛弘、三井 大輔、今関 等、湯川 雅枝、放医研液滴 PIXE 分析装置への HPLC 導入 (第 1 報)。第 23 回 P I X E シンポジウム、宮城県松島町、2006

武田 志乃、磯 浩之、西村 義一、湯川 雅枝、微小ビーム分析における分析標準の開発。第 23 回 P I X E シンポジウム、宮城県松島町、2006

酢屋 徳啓、大町 康、須田 充、萩原 拓也、高田 真志、濱野 毅、宮原 信幸、今関 等、島田 義也、放医研中性子発生用加速器システムの現状。日本放射線影響学会第 49 回大会、札幌、2006

小西 輝昭、夏目 敏之、安田 仲宏、今関 等、古澤 佳也、佐藤 幸夫、檜枝 光太郎、Bragg ピーク近傍の重粒子イオンを用いたイオン特異的な細胞致死効果の測定。日本放射線影響学会第 49 回大会、札幌、2006

濱野 毅、安田 仲宏、小西 輝昭、石川 剛弘、磯 浩之、王 旭飛、今関 等、放医研シングルイオン細胞照射装置 (SPICE) の開発。日本放射線影響学会第 49 回大会、札幌、2006

古澤 佳也、取越 正己、大野 由美子、鈴木 雅雄、鶴澤 玲子、小池 幸子、大町 康、小西 輝昭、安藤 興一、その他、放射光マイクロスリットビームを用いた移植腫瘍の増殖遅延。日本放射線影響学会第 49 回大会、

札幌、2006

鈴木 雅雄、鶴岡 千鶴、取越 正己、大野 由美子、八木 直人、小西 輝昭、夏堀 雅宏、梅谷 啓二、篠原 邦夫、小山田 敏文、古澤 佳也、シンクロトロン放射光スリット状X線マイクロビーム誘発バースタンダー致死効果。日本放射線影響学会第49回大会。札幌、2006

安田 仲宏、小西 輝昭、濱野 毅、磯 浩之、石川 剛弘、王 旭飛、今関 等、放医研マイクロビーム細胞照射装置 (SPICE) の現状—細胞照射顕微鏡を中心に—。第19回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、群馬県みどり市、2006

Masayuki Muramatsu, Present status of NIRS ECR ion sources, 第17回ECRイオン源とその応用に関する国際ワークショップ, China, 北京, 蘭州, 2006

斉藤 彩、石田 有香、大町 康、その他、 γ 線胎児期被ばくによるBALB/cマウス小脳虫部形成異常。第49回日本放射線影響学会、山口、2006

鈴木 雅雄、鶴岡 千鶴、内堀 幸夫、北村 尚、線質の異なる放射線低線量照射によって誘導される細胞応答の違い。日本宇宙生物科学学会第20回大会、大阪市、2006

Nakahiro Yasuda, Yukio Uchihori, Hisashi Kitamura, et.al., Intercomparison of passive radiation monitors in Russian segment of ISS (BRADOS Space Intercomparison), 23rd International Conference on Nuclear Tracks in Solids, China, 2006

Nakahiro Yasuda, Yukio Uchihori, Hisashi Kitamura, Yury Akatov, Vyacheslav Shurshakov, Ikuo Kobayashi, Hiroyuki Ohguchi, Yasuhiro Koguchi, Spatial distribution and high LET component of absorbed dose measured by passive radiation monitors in ISS Russian segment, 11th WRMISS Workshop, UK, Oxford, 2006

Hisashi Kitamura, Yukio Uchihori, Nakahiro Yasuda, Eric Benton, Thomas Berger, Michael Hajek, Jack Miller, Heavy ion beam characteristics of ICCHIBAN 7 and 8 experiments and brief summary of the ICCHIBAN experiments, 11th WRMISS Workshop, UK, Oxford, 2006

安田 仲宏、Mark Akselrod、ベントン エリック、内堀 幸夫、北村 尚、小林 育夫、蛍光飛跡検出器の開発。第67回応用物理学会学術講演会、滋賀県草津市、2006

Masao Suzuki, Chizuru Tsuruoka, Yukio Uchihori, Hisashi Kitamura, Radiation-quality dependence in mutation induction induced with the pre-treatment of low-fluence particle radiations, 第27回国際重力生理学会、大阪市、2006

Nakahiro Yasuda, Yukio Uchihori, Hisashi Kitamura, Eric Benton, Michael Hajek, Thomas Berger, Vyacheslav Shurshakov, Yury Akatov, Mieko Kurano, BRADOS/Space Intercomparison: An International Experiment to Intercompare Passive Space Radiation Dosimeters on ISS, 4th International Workshop on Space Radiation Research and Annual NASA Space Radiation Health Investigators' Workshop, Russia, Moscow, St. Petersburg, 2006

今関 等、国内外の生物用マイクロビーム照射実験施設の現状。第 4 回イオンビーム生物応用研究ワークショップ、高崎、2005

今関 等、石川 剛弘、濱野 毅、湯川 雅枝、磯 浩之、PIXE における照射量評価に関する考察その 2。第 22 回 P I X E シンポジウム、敦賀市、2005

今関 等、濱野 毅、湯川 雅枝、古澤 佳也、安田 伸宏、石川 剛弘、酢屋 徳啓、小西 輝昭、磯 浩之、マイクロビーム細胞照射装置 (SPICE) の現状。日本放射線影響学会第 48 回大会、第 1 回アジア放射線研究会議、広島市、2005

藤森 亮、岡安 隆一、石原 弘、吉田 聡、笠井 清美、野島 久美恵、海老沢 悟、高橋 千太郎、ヒト胎児由来正常繊維芽細胞に極低線量 X 線によって同時に誘導された遺伝子の共通機能。日本放射線影響学会第 48 回大会、広島市、2005

古澤 佳也、王 旭飛、舟山 知夫、小林 克己、今関 等、その他、日本・アジアのマイクロビーム生物研究施設、日本放射線影響学会第 48 回大会、広島市、2005

石川 裕二、山本 直之、吉本 正美、保田 隆子、丸山 耕一、景 崇洋、伊藤 博信、硬骨魚メダカの間脳の発生、第 7 回シンポジウム「水生動物の行動と神経系」、三浦市、2005

Masae Yukawa, Kazuko Aoki, Hiroyuki Iso, Kumiko Kodama, Hitoshi Imaseki, Yuuji Ishikawa, Determination of Metal Balance Shift Induced in Small Fresh Water Fish by X-ray Irradiation Using PIXE Analysis, Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry-05, Beijing, 2005

石川 剛弘、今関 等、四野宮 貴幸、磯 浩之、濱野 毅、湯川 雅枝、放医研 液滴 P I X E システムの開発。第 18 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、福岡市、2005

石田 有香、大町 康、平岡 武、伏木 信次、島田 義也、荻生 俊昭、神経細胞アポトーシスを指標とした放射線誘発マウス胎児脳神経発生障害の解析。第 32 回 日本トキシコロジー学会学術年会、東京都、2005

大町 康、桑原 義和、辻 秀雄、辻 さつき、伴 信彦、柿沼 志津子、西村 まゆみ、石田 有香、荻生 俊昭、相澤 志郎、島田 義也、C3H マウス骨髄性白血病における造血分化転写因子 PU.1 遺伝子の突然変異解析。第 32 回 日本トキシコロジー学会学術年会、東京都、2005

Yukio Uchihori, Hisashi Kitamura, Masaharu Okano, Eric Benton, Tsvetan Dachev, Radiation measurements on commercial aircrafts and ER-2 at high altitude using Liulin-4J silicon spectrometer, Eleventh international scientific conference, solar-terrestrial influences, Sofia, 2005

Yukio Uchihori, Nakahiro Yasuda, Hisashi Kitamura, Eric Benton, Intercomparison of space radiation monitors for cosmonauts and astronauts using accelerator beams on ground, Eleventh international scientific conference, solar-terrestrial influences, Sofia, 2005

Yukio Uchihori, Hisashi Kitamura, Kazunobu Fujitaka, Nakahiro Yasuda, Eric Benton, Jack Miller, et.al., NSRL-ICCHIBAN Brief Report, ICCHIBAN-7&8 Announcement and Future ICCHIBAN Experiments, 10th WRMIS, 千葉, 2005

内堀 幸夫、安田 伸宏、北村 尚、高島 健、月面基地と火星探査における宇宙放射線被ばく。第2回「宇宙環境シンポジウム」、つくば市、2005

安田 伸宏、内堀 幸夫、北村 尚、藤高 和信、岩淵 真也、国際宇宙ステーション・ロシアモジュールにおける積算型放射線検出器の国際比較実験。第20回固体飛跡検出器研究会、東大阪市、2005

内堀 幸夫、藤高 和信、安田 伸宏、北村 尚、ベントン エリック、その他、宇宙放射線モニター国際比較実験 ICCHIBAN の現状。日本保健物理学会 第39回研究発表会、青森県六ヶ所村、2005

Yukio Uchihori, Kazunobu Fujitaka, Hisashi Kitamura, Kumie Nojima, Masaharu Okano, Space Radiation Measurements by NaI and LiI Scintillation Spectrometers and Liulin-4J Silicon Spectrometer in Japanese Air Lines, AOGS, 2nd Annual Meeting 2005, Singapore, Singapore, 2005

資料・研究・技術・調査報告

小西 輝昭、安田 仲宏、北村 尚、前田 武、児玉 久美子、今関 等、古澤 佳也、檜枝 光太郎、Bragg ピーク近傍の重粒子イオン照射による細胞致死及び DNA 二本鎖切断誘発率の測定。放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書、2008

小西 輝昭、安田 仲宏、森 雅彦、前田 武、石川 剛弘、児玉 久美子、檜枝 光太郎、ヒト HCT116 細胞を用いた重粒子イオンの低線量領域における超放射線感受性と DNA 損傷修復機構の研究。放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書、2008

Kurt Hafer, Teruaki Konishi, Schiestl Robert, The role of high LET radiation induced persistent oxidative stress and nucleotide excision repair on genomic instability in mammalian cells, 放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書、2008

前田 武、高野 裕之、濱野 毅、石川 剛弘、松下 良平、嘉陽 千秋、宮原 信幸、今関 等、共同実験機器・施設。放射線医学総合研究所技術報告書、1(2007)48-104

三井 大輔、石川 剛弘、磯 浩之、酢屋 徳啓、今関 等、X 線棟第 3 照射室の X 線発生装置 PANTAK HF-320 型 X 線管交換に伴う照射野の調整と線量測定結果。放射線医学総合研究所技術報告書、1(2007)43-47

石川 剛弘、磯 浩之、小西 輝昭、北村 尚、濱野 毅、今関 等、PIXE 分析法における定量法の確立 (1) ~ビーム電流リアルタイム測定システムの開発~。放射線医学総合研究所技術報告書、1(2007)37-42

磯 浩之、小西 輝昭、石川 剛弘、三井 大輔、今関 等、湯川 雅枝、液滴 PIXE 分析装置への HPLC 導入。放射線医学総合研究所技術報告書、1(2007)32-36

小西 輝昭、児玉 久美子、大熊 俊介、磯 浩之、石川 剛弘、安田 仲宏、檜枝 光太郎、今関 等、SPICE マイクロビーム照射装置を用いた生物実験のための細胞試料作成法。放射線医学総合研究所技術報告書、1(2007)24-32

萩原 拓也、須田 充、酢屋 徳啓、小西 輝昭、濱野 毅、宮原 信幸、高田 真志、大町 康、平岡 武、今関 等、マウス放射化実験結果報告。放射線医学総合研究所技術報告書、1(2007)14-19

王 旭飛、小西 輝昭、濱野 毅、安田 仲宏、今関 等、石川 剛弘、磯 浩之、酢屋 徳啓、湯川 雅枝、Development of single particle microbeam irradiation system for radiation biology、放射線医学総合研究所技術報告書、1(2007) 8-13

酢屋 徳啓、須田 充、萩原 拓也、中性子照射用加速器メンテナンス状況。放射線医学総合研究所技術報告書、1(2007)20-23

上野 渉、早尾 辰雄、新妻 大介、石原 直樹、宇野 真弘、森竹 浩之、石井 学、永井 絢也、鈴木 大輔、竹内 隆二、伊田 大貴、伊藤 正人、南久松 丈晴、宇原 英樹、川島 直行、河野 明広、池田 学、渡邊 香里、小久保 年章、松下 悟、放医研で繁殖している SPF 近交系マウスの解剖学的特性。(6) C57BL/10 および B10 コンジェニック系 (B10.BR,B10.D2,B10.Thy1.1/Nrs) について。放射線科学、50(2007)22-35

酢屋 徳啓、濱野 毅、須田 充、宮原 信幸、高田 真志、萩原 拓也、今関 等、中性子発生用加速器システム (NASBEE) におけるターゲットの開発。放射線科学、50(2007)21-23

小西 輝昭、石川 剛弘、磯 浩之、安田 仲宏、濱野 毅、酢屋 徳啓、児玉 久美子、大熊 俊介、檜枝 光太郎、今関 等、SPICE マイクロビーム照射装置を用いた生物実験のための細胞試料作成法。放射線科学、50(2007)18-20

前田 武、小西 輝昭、高野 裕之、共実機器のメンテナンス。放射線科学、50(2007)26-28

北村 尚、内堀 幸夫、安田 仲宏、宇宙放射線計測器の国際比較実験(ICCHIBAN)。放射線科学、50(2007)8-10

早尾 辰雄、上野 渉、新妻 大介、大久保 喬司、宇野 真弘、竹内 隆二、石井 学、伊藤 正人、藤井 功輔、永井 絢也、森竹 浩之、鈴木 大輔、南久松 丈晴、伊田 大貴、石原 直樹、川島 直行、河野 明広、池田 学、渡邊 香里、小久保 年章、西川 哲、松下 悟、放医研で繁殖している SPF 近交系マウスの解剖学的特性。(7) C3H/HeNrs-Atmtm1Awb/NrsFnt について。放射線科学、50(2007)11-24

坂内 忠明、阿部 杏子、海老澤 悟、職場体験学習としての「ガラスの着色」。放射線教育、10(2007)53-58

小西 輝昭、大熊 俊介、安田 仲宏、古澤 佳也、今関 等、檜枝 光太郎、Bragg ピーク近傍の重粒子イオンを用いたイオン特異的なDNA損傷の誘発と修復。放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書、2006(2007)100-102

鈴木 雅雄、鶴岡 千鶴、内堀 幸夫、北村 尚、重粒子線低線量照射が及ぼす生物影響に関する研究。放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書、2006(2007)68-70

鈴木 雅雄、鶴岡 千鶴、安田 仲宏、小西 輝昭、渡邊 宗一郎、松尾 隆弘、粒子線低密度照射による細胞死・突然変異・染色体損傷誘発のバイスタンダー効果。放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書、2006(2007)65-66

小西 輝昭、夏目 敏之、安田 仲宏、佐藤 幸夫、古澤 佳也、檜枝 光太郎、Bragg ピーク近傍の重粒子イオンを用いたイオン特異的な損傷の誘発と修復。放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書、2005(2006)108-110

早尾 辰雄、上野 渉、新妻 大介、宇原 英樹、石原 直樹、宇野 真弘、森竹 浩之、石井 学、永井 絢也、鈴木 大輔、斉藤 七海、大久保 喬司、伊藤 正人、川島 直行、河野 明広、池田 学、渡邊 香里、小久保 年章、松下 悟、放医研で繁殖している SPF 近交系マウスの解剖学的特性。(5)BALB/c-nu/nu,BALB/c-nu/+について。放射線科学、49(2006)87-97

大町 康、石田 有香、平岡 武、濱野 毅、高田 真志、宮原 信幸、辻 さつき、柿沼 志津子、和泉 志津恵、辻 秀雄、西村 まゆみ、神田 玲子、相澤 志郎、島田 義也、荻生 俊昭、10MeV 中性子線の生体への影響に関する研究。サイクロトロン利用報告書、(2006)21-24

上野 渉、早尾 辰雄、新妻 大介、宇原 英樹、石原 直樹、宇野 真弘、森竹 浩之、石井 学、永井 絢也、鈴木 大輔、斉藤 七海、川島 直行、河野 明広、池田 学、渡邊 香里、小久保 年章、松下 悟、放医研で繁殖している SPF 近交系マウスの解剖学的特性。(4)A/JNrs について。放射線科学、48(2005)245-253

早尾 辰雄、上野 渉、新妻 大介、宇原 英樹、渡邊 香里、石原 直樹、宇野 真弘、森竹 浩之、石井 学、永井 絢也、鈴木 大輔、斉藤 七海、稲葉 久義、川島 直行、河野 明広、松下 悟、放医研で繁殖している SPF 近交系マウスの解剖学的特性。(3)C3H/HeJ-b g について。放射線科学、48(2005)63-73

荻生 俊昭、大町 康、石田 有香、三枝 新、平岡 武、濱野 毅、石原 弘、田中 泉、高田 真志、宮原 信幸、伏木 信次、10MeV 中性子線の生体への影響に関する研究。サイクロトロン利用報告書、(2005)35-39

特許登録

湯川 雅枝、今関 等、山口 寛、その他、マイクロイオンビーム形成装置、特許第 4046275、2007

プレス発表・プレス報道

今関 等、その他、マイクロビーム細胞照射装置ビームサイズ5μメートル以下 世界トップ水準を実現、2007

ソフトウェア開発

前田 武、カウントダウンタイマー、2008

前田 武、平成 19 年度「技術と安全の報告会」演題募集システム、2008

前田 武、共同実験機器共有情報掲示板、2007

前田 武、コバルト照射装置予約システム、2007

前田 武、ラドン実験施設予約システム、2007

前田 武、「安全に対する取り組み」電子掲示板、2007

前田 武、静電加速器棟 在域表示システム、2007

前田 武、平成 18 年度「技術と安全の報告会」演題募集システム、2007

前田 武、3R's (Reduce, Reuse, Recycle) システム、2007

前田 武、研究基盤技術部スケジュール管理システム、2006

前田 武、放射線発生装置予約システム、2006

前田 武、共同実験機器予約システム、2006

データベース構築

前田 武、資産情報管理データベース、2006

ポスター発表

Tsuyoshi Hamano, Teruaki Konishi, Takahiro Ishikawa, Hiroyuki Iso, Nakahiro Yasuda, Noriyoshi Suya, Hitoshi Imaseki, Development of Unitary Construction Type Beam Window for SPICE, 11th International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Application, Hungary, Debrecen, 2008

Teruaki Konishi, Takahiro Ishikawa, Hiroyuki Iso, Kumiko Kodama, Nakahiro Yasuda, Tsuyoshi Hamano, Noriyoshi Suya, Hitoshi Imaseki, Biological studies using mammalian cell lines and the current status of the microbeam irradiation system, SPICE, 11th International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Application, Hungary, Debrecen, 2008

Takahiro Ishikawa, Hiroyuki Iso, Masakazu Oikawa, Teruaki Konishi, Hisashi Kitamura, Yuichi Higuchi, Noriyoshi Suya, Tsuyoshi Hamano, Hitoshi Imaseki, Design and verification of measurement system for ion dose normalization in microbeam scanning PIXE system at NIRS, 11th International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Application, Hungary, Debrecen, 2008

水野 和恵、姜 美玲、森 梓、遊佐 訓孝、小西 輝昭、濱野 毅、石川 剛弘、磯 浩之、加藤 宝光、岡安 隆一、今関 等、上坂 充、影型および治療型 X 線薬品送達システムに関する研究。日本原子力学会 2008 年春の年会 学生ポスターセッション、吹田市、2008

石川 剛弘、磯 浩之、小西 輝昭、濱野 毅、今関 等、Si(Li)検出器と純ゲルマ検出器の二つの検出器を用いた軽～重元素同時分析。平成 19 年度 実験・実習技術研究会、徳島市、2008

前田 武、今関 等、万年 WEB カレンダーの作成と応用。第 3 回技術と安全の報告会、千葉市、2008

三井 大輔、石川 剛弘、磯 浩之、酢屋 徳啓、濱野 毅、今関 等、X 線発生装置 PANTAK HF-320 における照射野の調整と線量測定。第 3 回技術と安全の報告会、千葉市、2008

石川 剛弘、三井 大輔、磯 浩之、酢屋 徳啓、小西 輝昭、濱野 毅、今関 等、X 線棟の現状 2007。第 3 回技術と安全の報告会、千葉市、2008

磯 浩之、石川 剛弘、小西 輝昭、酢屋 徳啓、濱野 毅、今関 等、静電加速器棟 (PASTA&SPICE) における利用状況 2007。第 3 回技術と安全の報告会、千葉市、2008

小西 輝昭、石川 剛弘、磯 浩之、濱野 毅、安田 仲宏、酢屋 徳啓、児玉 久美子、今関 等、マイクロビーム細胞照射装置 (SPICE) の現状。第 3 回技術と安全の報告会、千葉市、2008

須田 充、萩原 拓也、小西 輝昭、島田 義也、高倉 伸夫、酢屋 徳啓、濱野 毅、中性子線照射装置 (NASBEE) の現状 2007。第 3 回技術と安全の報告会、千葉市、2008

高野 裕之、大内 良夫、潮見 聡、前田 武、共同実験施設の管理 2007。第 3 回技術と安全の報告会、千葉、2008

酢屋 徳啓、三井 大輔、石川 剛弘、前田 武、濱野 毅、平岡 武、ガンマ線棟 296GBq 137Cs によるガンマ線照射場の設定。第 3 回技術と安全の報告会、千葉、2008

酢屋 徳啓、濱野 毅、須田 充、高田 真志、萩原 拓也、小西 輝昭、宮原 信幸、今関 等、中性子発生用加速器システム (NASBEE) におけるターゲットの開発。第 20 回タンデム加速器およびその周辺技術の研究会、茨城県那珂郡東海村、2007

今関 等、柳沼 尚紀、吉富 友恭、武田 志乃、ヒゲナガカワトビケラ (*Stenopsyche marmorata*) における重金属分布の解析に関する研究。第 2 回技術と安全の報告会、千葉市、2007

須田 充、酢屋 徳啓、萩原 拓也、濱野 毅、宮原 信幸、今関 等、低線量影響実験棟中性子発生用加速器の線量分布の現状。第 2 回技術と安全の報告会、千葉市、2007

酢屋 徳啓、須田 充、萩原 拓也、濱野 毅、宮原 信幸、今関 等、低線量影響実験棟中性子発生用加速器の現状。第 2 回技術と安全の報告会、千葉市、2007

前田 武、小西 輝昭、高野 裕之、共実機器のメンテナンス。第 2 回技術と安全の報告会、千葉市、2007

松下 良平、前田 武、濱野 毅、永島 政則、松下 悟、西村 義一、放医研における 3R's (Reduce, Reuse, Recycle) システムの開発。第 2 回技術と安全の報告会、千葉市、2007

濱野 毅、高田 真志、須田 充、萩原 拓也、前田 武、宮原 信幸、交換式中性子発生用ターゲットシステムの製作。第 2 回技術と安全の報告会、千葉市、2007

平岡 武、三井 大輔、萩原 拓也、濱野 毅、第 1 ガンマ線棟 Co-60 照射装置 (111TBq) の線量測定。第 2 回技術と安全の報告会、千葉市、2007

小西 輝昭、石川 剛弘、磯 浩之、安田 伸宏、大熊 俊介、児玉 久美子、濱野 毅、酢屋 徳啓、今関 等、Biological studies using human cell lines and the current status of the microbeam irradiation system, SPICE、13th International Congress of Radiation Research, USA, San Francisco, 2007

Katsumi Saitoh, Takahiro Ishikawa, Hiroyuki Iso, Shuuichi Hasegawa, Akihiro Fushimi, Shinji Kobayashi, Kiyoshi Tanabe, Teruaki Konishi, Hitoshi Imaseki, Development of sample preparation method for engine lubricating oil analysis using in-air PIXE, Proceedings of the XI International Conference on PIXE and its Analytical Applications (PIXE2007), Mexico, Puebla, 2007

前田 武、四野宮 貴幸、磯 浩之、宮原 信幸、今関 等、WEB を用いた共用機器運用システム。平成 18 年度名古屋大学総合技術研究会、名古屋市、2007

石川 剛弘、磯 浩之、小西 輝昭、北村 尚、濱野 毅、今関 等、PIXE 分析法におけるビーム電流リアルタイム測定システムの開発。平成 18 年度名古屋大学総合技術研究会、名古屋市、2007

松下 良平、前田 武、濱野 毅、永島 政則、松下 悟、西村 義一、放医研における 3 R's (Reduce, Reuse, Recycle) システムの開発。平成 18 年度名古屋大学総合技術研究会、名古屋市、2007

鈴木 雅雄、古澤 佳也、取越 正己、大野 由美子、鶴岡 千鶴、八木 直人、梅谷 啓二、小西 輝昭、小山田 敏文、夏堀 雅宏、Radiobiological pilot study of synchrotron generated microplaner beam, a possible modality of radiotherapy、日本癌学会第 66 回総会、横浜市、2007

古澤 佳也、取越 正己、大野 由美子、鈴木 雅雄、鶴澤 玲子、小池 幸子、大町 康、小西 輝昭、安藤 興一、その他、マイクロプラナービームによるマウス腫瘍増殖抑制効果。第 20 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、広島、2007

Akira Fujimori, Kouichi Maruyama, Takako Yasuda, Yoshihisa Kubota, Sentaro Takahashi, Yuuji Ishikawa, Expression of brain-type fatty acid-binding protein (Fabp7) in medaka development, 第 30 回日本分子生物学会年会, 横浜, 2007

保田 隆子、前田 圭子、石川 裕二、発生中の脳で起こる放射線誘発アポトーシスの発生から貪食まで全過程のメダカ胚を用いた可視化。日本放射線影響学会第 50 回大会、千葉市、2007

石田 有香、大町 康、荻生 俊昭、西川 哲、島田 義也、その他、2MeV 中性子線により誘発されるマウス胎児脳神経細胞アポトーシスの経時変化における解析。日本放射線影響学会第 50 回大会、千葉市、2007

Masayuki Muramatsu, Application of compact ECR ion source, 第 12 回イオン源国際会議, Korea, 済州島, 2007

山内 啓史、斉藤 彩、石田 有香、大町 康、中山 裕之、放射線照射がマウス胎盤の細胞死と細胞増殖に及ぼす影響。第 100 回日本繁殖生物学会、東京、2007

北村 尚、身近にある放射線の計測。中学・高校生のためのやさしい科学セミナー in OSAKA、大阪市、2007

Masao Suzuki, Chizuru Tsuruoka, Yukio Uchihori, Hisashi Kitamura, Radiation-quality dependence of genomic instability in mutation induced by the pre-treatment with low-fluence heavy ions, 第13回 International Congress of Radiation Research, USA, San Francisco, 2007

Xufei Wang, Teruaki Konishi, Tsuyoshi Hamano, Nakahiro Yasuda, Hitoshi Imaseki, Takahiro Ishikawa, Hiroyuki Iso, Noriyoshi Suya, Masae Yukawa, Development of single particle microbeam irradiation system for radiation biology, 10th International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications, Singapore, Sentosa, 2006

Katsumi Sito, Hitoshi Imaseki, Masae Yukawa, Elemental Analysis of Atmospheric Particle Collected on Quartz-fiber and PTFE Filters Using In-air Helium Ion Induced X-ray Emission Method, 10th International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications, Singapore, Sentosa, 2006

Hitoshi Imaseki, Takahiro Ishikawa, Hiroyuki Iso, Teruaki Konishi, Noriyoshi Suya, Tsuyoshi Hamano, Xufei Wang, Nakahiro Yasuda, Masae Yukawa, Progress report of the single particle irradiation system to cell (SPICE), 10th International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications, Singapore, Sentosa, 2006

酢屋 徳啓、須田 充、萩原 拓也、濱野 毅、宮原 信幸、今関 等、放医研中性子発生用加速器システムの現状。第19回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、群馬県みどり市、2006

新見 文香、高倉 かほる、磯 浩之、湯川 雅枝、その他、Bragg ピーク近傍の重粒子イオンを用いたイオン特異的な細胞致死効果の測定。日本放射線影響学会第49回大会、札幌市、2006

新見 文香、高倉 かほる、磯 浩之、湯川 雅枝、その他、軟X線照射により誘起されるCu-ATM導入低酸素細胞の染色体損傷。日本放射線影響学会第49回大会、札幌市、2006

保田 隆子、石川 裕二、丸山 耕一、青木 一子、前田 圭子、田口 泰子、伏木 信次、松本 厚子、武田 洋、その他、発生中のメダカの脳に対する放射線影響について。日本放射線影響学会 第49回札幌大会、札幌市、2006

石田 有香、大町 康、高井 伸彦、平岡 武、島田 義也、荻生 俊昭、速中性子線胎内被ばくマウスの脳神経発達影響に関する行動学的・病理学的研究。日本放射線影響学会第49回大会、札幌市、2006

大町 康、甘崎 佳子、柿沼 志津子、西村 まゆみ、石田 有香、荻生 俊昭、島田 義也、中性子線誘発マウス骨髄性白血病における造血分化転写因子 PU.1 遺伝子の突然変異解析。日本放射線影響学会第49回大会、札幌市、2006

前田 武、高野 裕之、共同実験施設・設備の維持、管理、運用。平成 17 年度放医研技術報告会、千葉市、2006

石川 裕二、山本 直之、吉本 正美、保田 隆子、丸山 耕一、景 崇洋、武田 洋幸、伊藤 博信、硬骨魚の間脳感覚性中継核の発生的起源－脊椎動物の間脳構成は共通である。第 29 回日本神経科学大会、京都、2006

Masayuki Muramatsu, Present status of compact ECR ion source, 第 3 回日本加速器学会年会, 仙台市, 2006

Wataru Ueno, Naoyuki Kawashima, Toshiaki Kokubo, Manabu Ikeda, Youhei Gotou, Kaori Watanabe, Satoru Matsushita, A Newly Constructed SPF Animal Facility, -Low Dose Radiation Effects Research Building-, in The National Institute of Radiological Science, Japan, 第 2 回アジア実験動物学会連合 (AFLAS) 学術大会, Korea, 済州島西帰浦, 2006

Nakahiro Yasuda, Eric Benton, Yukio Uchihori, Hisashi Kitamura, Thomas Berger, Michael Hajek, Recent Results from the ICCHIBAN Project for Intercomparison of Space Radiation Dosimeters, 4th International Workshop on Space Radiation Research and Annual NASA Space Radiation Health Investigators' Workshop, Russia, Moscow, St. Petersburg, 2006

磯 浩之、湯川 雅枝、青木 一子、児玉 久美子、今関 等、X線照射によるメダカ中の必須元素バランスシフト。アイソトープ・放射線研究発表会、東京都、2005

磯 浩之、石川 剛弘、酢屋 徳啓、小西 輝昭、濱野 毅、安田 仲宏、今関 等、湯川 雅枝、マイクロビーム細胞照射装置 (SPICE) の現状。第 18 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、福岡市、2005

萩原 拓也、須田 充、酢屋 徳啓、金 ウンジュ、濱野 毅、宮原 信幸、鈴木 敏和、今関 等、放医研低線量棟中性子照射システムの現状。第 18 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、福岡市、2005

Takahiro Ishikawa, Hitoshi Imaseki, Hiroyuki Iso, Takayuki Shinomiya, Tsuyoshi Hamano, Masae Yukawa, User-friendly droplet-PIXE system for quantitative analysis, Workshop on Accelerator Operation 2005, USA, Illinois, Blumindal, 2005

松下 悟、榎本 昭雄、上野 渉、萩生 俊昭、島田 義也、大町 康、森 貞次、鈴木 仁、池田 保、今関 等、濱野 毅、放医研の新動物施設「低線量影響実験棟」について。第 139 回日本獣医学会学術集会、和光市、2005

Hitoshi Imaseki, Takahiro Ishikawa, Hiroyuki Iso, Takayuki Shinomiya, Tsuyoshi Hamano, Masae Yukawa, Development of Droplet-PIXE system for Environmental Monitoring Samples, 5th International Symposium on BioPIXE, New Zealand, Wellington, 2005

石川 裕二、高島 茂雄、景 崇洋、保田 隆子、猪早 敬二、丸山 耕一、荒木 和男、武田 洋幸、脳の左右対称的形成に関わるメダカミュータントの研究。第 11 回小型魚類研究会、岡崎市、2005

Masayuki Muramatsu, 11th International Conference on Ion Sources, 第 11 回イオン源国際会議, France, Khan, 2005

村松 正幸、普及型炭素線がん治療用小型 ECR イオン源の開発。第 2 回日本加速器学会年会・第 30 回リニアック技術研究会、鳥栖市、2005

石田 有香、大町 康、高井 伸彦、平岡 武、島田 義也、荻生 俊昭、速中性子線胎内被ばくマウスの神経行動に関する基礎的検討。日本放射線影響学会第 48 回大会 第 1 回アジア放射線影響研究会議、広島市、2005

大町 康、石田 有香、和泉 志津恵、平岡 武、中田 有紀子、島田 義也、荻生 俊昭、10MeV 速中性子線誘発マウス骨髄性白血病に関する実験病理学的研究 中間報告。日本放射線影響学会第 48 回大会 第 1 回アジア放射線影響研究会議、広島市、2005

Yukio Uchihori, Toshisuke Kashiwagi, Kinya Hibino, Hisashi Kitamura, Syouji Okuno, Takeshi Takashima, Kaori Yajima, Mamoru Yokota, Kenji Yoshida, Investigation of Synthetic Diamond Radiation Detector Using Heavy Ion Beams, IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference, Fajardo, Puerto Rico, 2005

Yukio Uchihori, Hisashi Kitamura, Kazunobu Fujitaka, Nakahiro Yasuda, Eric Benton, Radiation test for electric parts of EUSO Photo Detector Module, 29th International Cosmic Ray Conference, India, Pune, 2005

内堀 幸夫、藤高 和信、北村 尚、野島 久美恵、岡野 眞治、その他、国際便における航空環境の宇宙線の測定結果。日本保健物理学会 第 39 回研究発表会、青森県六ヶ所村、2005

総説

小西 輝昭、石川 剛弘、磯 浩之、濱野 毅、酢屋 徳啓、安田 仲宏、児玉 久美子、今関 等、放医研マイクロビーム細胞照射装置 SPICE の開発。放射線生物研究、43(2008)170-176

金井 達明、野田 耕司、古川 卓司、藤澤 高志、岩田 佳之、金澤 光隆、兼松 伸幸、北川 敦志、小森 雅孝、蓑原 伸一、村上 健、村松 正幸、佐藤 眞二、武井 由佳、取越 正己、米内 俊祐、田代 睦、山田 聡、遊佐 顕、普及型炭素線がん治療装置の開発。放射線科学、50(2007)28-32

解説・紹介記事

今関 等、特集／第1回共用施設 (PASTA&SPICE) 共同研究成果報告会。放射線科学、51(2008)4-15

平岡 武、三井 大輔、酢屋 徳啓、濱野 毅、石川 剛弘、前田 武、宮原 信幸、 $^{296}\text{Bq}^{137}\text{Cs}$ ガンマ線照射装置の線量測定。医用標準線量、13(2008)1-9

三井 大輔、石川 剛弘、酢屋 徳啓、磯 浩之、濱野 毅、今関 等、平岡 武、照射用 X 線装置の線量定期点検データ。医用標準線量、13(2008)21-26

小西 輝昭、石川 剛弘、磯 浩之、濱野 毅、安田 仲宏、酢屋 徳啓、Hafer Kurt、児玉 久美子、大熊 俊介、檜枝 光太郎、今関 等、マイクロビーム細胞照射装置－標的細胞核にプロトンを狙い撃ち。Isotope News、647(2007)8-12

平岡 武、三井 大輔、石川 剛弘、濱野 毅、今関 等、円筒状に配置した $^{111}\text{TBq}^{60}\text{Co}$ 線源の線量測定。医用標準線量、12(2007)13-21

平岡 武、三井 大輔、石川 剛弘、濱野 毅、宮原 信幸、軟 X 線の線量測定。医用標準線量、12(2007)57-63

平岡 武、今関 等、濱野 毅、福村 明史、金井 達明、放医研サイクロトロンからの $d(25)+\text{Be}$ 速中性子線の線量特性。医用標準線量、10(2005)43-50

招待発表

Masayuki Muramatsu, Development of compact electron cyclotron resonance ion source with permanent magnets for high-energy carbon-ion therapy, 17th International Conference on Ion Implantation Technology, USA, Monterey, 2008

Yukio Uchihori, Eric Benton, Nakahiro Yasuda, Hisashi Kitamura, Michael Hajek, Thomas Berger, Cary Zeitlin, Jack Miller, Status of NSRL-ICCHIBAN, ICCHIBAN-7 and -8 and future ICCHIBAN experiments (solicited), 36th COSPAR Scientific Assembly, China, 北京, 2006

Masae Yukawa, Kazuko Aoki, Hiroyuki Iso, Kumiko Kodama, Hitoshi Imaseki, Yuuji Ishikawa, Metal Balance Shift Induced in Small Fresh Water Fish by Several Environmental Stresses, 5th Bio-PIXE International Symposium, New Zealand, Wellington, 2005

講義・講演

今関 等、放射線で観る。中学・高校生のためのやさしい科学セミナー、大阪市、2007

石田 有香、Neurobehavioral and pathological study of mice exposed to fast neutrons in utero, 中国における放射線研究施設の見学と意見交換 (1)、中国、済南市、2007

石田 有香、Neurobehavioral study of mice exposed to fast neutrons in utero, 中国における放射線研究施設の見学と意見交換 (2)、中国、蘇州市、2007

編集後記

今回の技術報告書では基盤技術部以外の方々から数多く原稿を投稿していただきました。前回の技術報告書は放射線計測技術開発室1名、放射線発生装置利用技術開発課8名計9名の投稿から比べると本巻号 Vol.2 は、それを上回る原稿数を投稿いただきました。さらに、本年度は、実験動物課から3名、さらに研究基盤技術部外からも2名の方々に加わり、合計15本もの技術報告書が揃いました。本技術報告書をさらに広めていきたいというコンセプトと創刊にあたっての我々の理念と思いが少しずつ所内の皆様がたにご理解いただけた結果であると考えております。放医研全体の技術報告書となるように、放射線医学総合研究所技術報告書(NIRS Technology)を広めていきたいと思えます。そして、放射線医学総合研究所において業務に従事する方々の個々の仕事の内容を紹介するだけでなく、その努力と成果を報告書という形に残すことにより、これらの経験やデータなどを所内の人たちの研究や技術開発に役立てていただけたらと思えます。

来年も Vol.3、Vol.4 の発刊を予定しております。今後も本技術報告書をより良いものにしていくとともに、より多くの方々に本技術報告書の意義に賛同していただけるように努力していこうと考えております。

ご多忙にもかかわらず本技術報告書の作成にあたりご協力いただいた放射線防護センター環境グループ水域チームの保田隆子さん、物理工学部の村松正幸さんにこの場を借りて感謝致します。

酢屋 徳啓

《編集担当》

編集委員長 酢屋 徳啓 (放射線発生装置利用技術開発課 主任技術員)
編集委員 小西 輝昭 (放射線発生装置利用技術開発課 技術員)、
平野 梨恵 (放射線発生装置利用技術開発課、(株)ネオステック)
安田 仲宏 (放射線計測技術開発室、主任研究員)
今関 等 (研究基盤技術部長)

平成20年度 放射線医学総合研究所 技術報告書 (基盤技術部)

NIRS Technology, Vol. 2 2008年9月 日発行

《発行》

独立行政法人 放射線医学総合研究所
基盤技術センター 基盤技術部
〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川4-9-1
TEL: 043-206-3031 FAX: 043-206-3514
e-mail: nirstech@nirs.go.jp