

---

宇宙放射線被ばく防護体系検討委員会  
平成 13-14 年度報告書

Committee on Radiological Protection in Space  
2001-2002 Report

---

独立行政法人 放射線医学総合研究所  
National Institute of Radiological Sciences

# 宇宙放射線被ばく防護体系 検討委員会 報告書

2003年 3 月



独立行政法人放射線医学総合研究所  
宇宙放射線被ばく防護体系検討委員会

Committee on Radiological Protection in Space  
National Institute of Radiological Sciences(NIRS)

# 目 次

はじめに.....	1
<b>I. 2001 年度および 2002 年度活動概要</b>	
1. 委員構成 .....	5
2. 議事・講演一覧.....	6
<b>II. 講演概要</b>	
1. 小村 和久 金沢大学低レベル放射能実験施設・ 尾小屋地下測定室の概要 .....	9
2. 土居 雅広 国連科学委員会(UNSCEAR)報告から .....	19
3. 甲斐 倫明 工学リスクと健康リスクについて考える .....	29
4. 瓜谷 章 産業技術総合研究所における宇宙放射線関連研究.....	37
5. 笠井 清美 細胞増殖への影響 .....	41
6. 長岡 俊治 宇宙放射線生物影響研究の問題と課題.....	45
7. 飯本 武志 宇宙飛行時の放射線防護のためのキーワード.....	57
8. 岡安 隆一 宇宙放射線生物研究への一考察 .....	65
9. 菊池 崇 宇宙放射線帯予報について .....	69
<b>III. 今後の方針 .....</b>	<b>79</b>
<b>付録</b>	
A1.第 2 回宇宙放射線研究国際ワークショップ (IWSSRR-2) について.....	83
A2.宇宙放射線被ばく防護体系検討委員会規程 .....	89

## はじめに

宇宙の仕組みを明らかにしようという意識はますます高まって来た。しかし一口に宇宙と言っても、宇宙そのものの存在の謎を解くのか、あるいは宇宙という対象の利用を意識するのか、など捉え方は様々である。前者はもちろん崇高な理想であるが、我々には少々荷が重い。ロケット等の飛翔体を念頭に置くのか、それとも宇宙の特性下での特殊な反応（物理、生物）に重点を置くのかでは自ずと行き方が異なる。宇宙をやっています、というとロケットを思い浮かべる人もいれば、その起源を思い浮かべる人もいるだろう。しかし正直いって、我々が扱えるのは宇宙活動する上で避けがたい宇宙放射線や微小重力の起こす反応に限られており、それは実は宇宙研究・宇宙利用を支えるインフラストラクチャである。将来的には医学利用という巨大なメリットを生むゆりかごである。

本委員会では、人間が何かを行う際に通奏低音のごとくのし掛かってくる宇宙放射線と微小重力に着目する。そしてそれらを量的に明らかにし、またそれらがもたらす便益と損害を注意深く調べている。2001年度と2002年度は主として下記の諸点に関わる情報交換と討議を行った。

- ・ 宇宙放射線防護に関わる基本的考え方
- ・ 宇宙放射線生物研究の現状と展望
- ・ 宇宙放射線に関わる設備・施設と国際状況

本報告書ではこれらの報告および審議の内容を、配布資料の一部とともに講演録の形式でとりまとめたものである。

藤高 和信

## 2001年度および2002年度活動概要

## I.2001 年度および 2002 年度活動概要

### 1.委員構成

本委員会に委員として参加いただき本報告書の作成にご協力いただいた方々の氏名（敬称略）及び所属を下記に示す。

委員長	飯田 孝夫	名古屋大学大学院 工学研究科
委員	飛鳥田 一朗	日本航空（株）健康管理室
委員	飯本 武志（2002 年度より）	東京大学原子力研究総合センター 放射線管理室
委員	瓜谷 章	独立行政法人産業技術総合研究所 計測標準研究部門 量子放射科 放射能中性子標準研究室
委員	甲斐 倫明	大分県立看護科学大学 人間科学講座 環境科学研究室
委員	金井 雅利（2001 年度まで）	宇宙開発事業団 企画室
委員	熊澤 蕃	（財）原子力発電技術機構原子力安全解析所 安全評価第三室
委員	小村 和久	金沢大学自然計測応用研究センター 低レベル放射能実験施設
委員	嶋田 和人（2002 年度より）	宇宙開発事業団 宇宙環境利用推進部 宇宙医学研究開発室
委員	中野 完（2001 年度まで）	宇宙開発事業団 セントリフュージプロジェクト 宇宙環境利用研究センター
委員	長岡 俊治	藤田保健衛生大学衛生学部 生理学教室
委員	野口 邦和	日本大学歯学部 R I 研究室
委員	藤高 和信	独立行政法人放射線医学総合研究所 放射線安全研究センター 宇宙放射線防護プロジェクト

(五十音順)

## 2. 議事・講演一覧

平成13年度

	講演・講演者（敬称略）	その他の議事
第1回委員会 2001. 9. 26	<p>「金沢大学低レベル放射能実験施設・尾小屋地下測定室の概要」 小村 和久（金沢大学）</p> <p>「国連科学委員会(UNSCEAR)報告から」 土居 雅広（放射線医学総合研究所）</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・飯田孝夫委員長（名古屋大学）より参考資料として宇宙線の高度分布についての研究の説明があった。</li> <li>・「今後の方針」について</li> </ul>
第2回委員会 2002. 2. 5	<p>「工学リスクと健康リスクについて考える」 甲斐 倫明（大分県立看護科学大学）</p> <p>「産業技術研究所における宇宙放射線関連研究」 瓜谷 章（産業技術総合研究所）</p> <p>「細胞増殖への影響」 笠井 清美（放射線医学総合研究所）</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・第2回宇宙放射線研究国際ワークショップの案内</li> <li>・来年度の活動内容、時期について</li> </ul>

平成14年度

第1回委員会 2002. 7. 1	<p>「宇宙放射線生物影響研究の問題と課題」 長岡 俊治（藤田保健衛生大学）</p> <p>「宇宙飛行時の放射線防護のためのキーワード」 飯本 武志（東京大学）</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・新委員（嶋田和人委員、飯本武志委員）の紹介</li> <li>・藤高委員より、来年度（平成15年度）の放射線安全センターシンポジウムで、宇宙放射線防護研究がテーマになることが正式に決まれば、宇宙放射線防護に関して様々な立場の方々を招いて話し合いの場としたという構想が明らかにされた。</li> </ul>
第2回委員会 2002. 12. 20	<p>「宇宙放射線生物研究への一考察」 岡安 隆一（放射線医学総合研究所）</p> <p>「宇宙放射線帯予報について」 菊池 崇（通信総合研究所）</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・来年度の活動予定について</li> </ul>

## 講演概要

## 「金沢大学低レベル放射能実験施設・尾小屋地下測定室の概要」

小村 和久(金沢大学)

### 【講演内容】

低レベル放射能実験施設は今から 25 年前、1976 年に発足した。来年度にはこの施設は臨海実験所および電磁場制御実験施設と統合して自然計測応用研究センターとして発足するが、当初はスタッフ 20 名ほどで研究を展開する予定である。

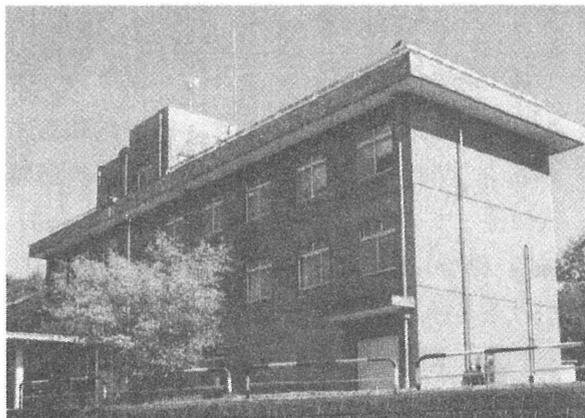


写真1 辰口町にある低レベル放射能実験施設(800m<sup>2</sup>)

施設(写真1)は小高い山の上にある三階建ての小さい建物で、その上部に気象関係のモニターが設置してある。教官、スタッフ、教授、助教授、助手、ポスドク、四年生とドクターコース合わせて4人の学生が、ここでプルトニウム測定、ウラン年代計測などを行っている。将来大きな施設を作りたいと思い、そのために大学や研究施設から不要になった鉛や鉄の箱を貰い(鉛は古いほどきれい)、遮蔽材として利用するつもりで、すでに約60トンを集めている。

ここから尾小屋の極低レベル実験室までは約20キロ、車で20-30分かかる。途中に石切場(凝灰岩で大谷石と同じ成分)があるが、平安神宮の礎石に指定され採掘が行われている。尾小屋鉱山も他の銅鉱山と同様SO<sub>2</sub>で完全なはげ山となったが、植林により少し戻った。かつて二千五、六百人が働いていたが、今はほとんど無人である。

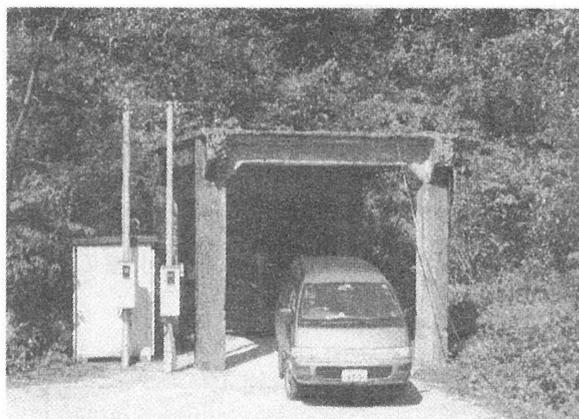


写真2 地下測定室入り口(300m地点に設置)

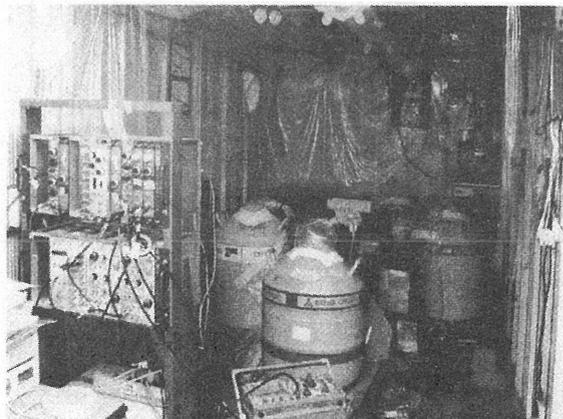


写真3 測定室内部(4台のGe検出器を設置)

測定室(写真2-3)は、長さ540mある

トンネルの、入口から約 300mのところ設置されている。この上に山がある。もともと運搬用のトンネルであり、現在は小松市の市道となっている。それを5年契約で借りて更新していく予定。将来はこの中に120平方メートルの部屋を作りたいと考えている。トンネルは東海大地震予知研究センター、名古屋大学などの地震研究グループなども利用している。標高が低いのでアクセスに便利。トンネルは素掘りで、凝灰岩のために岩質はねばっこい。この中にも10トンほど遮蔽材を運び入れて使っている。ここでは、バックグラウンドに寄与する中性子フラックスは地上の300分の1、ミューオンは200分の1に減弱する。

冬の間は車が入り口まで近づけないので、冷却用の液体窒素を担いで15mの階段を上り下りしなければならないのが難点である。尾小屋の閉山は30年前で、今は我々の施設と鉱山資料館がある。以上が尾小屋の概要である。

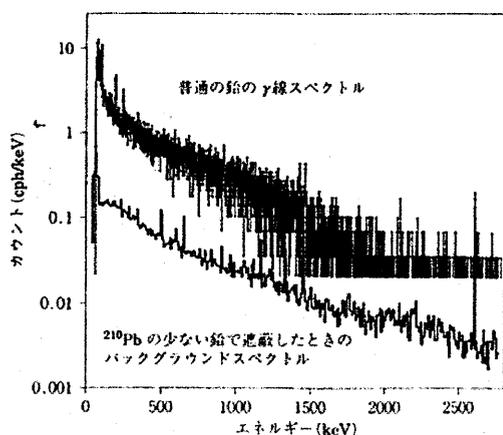


図1

低レベル放射能測定の指標は FOM (figure of merit) である。これは Signal を S とし、Background を B とした時、 $S^2/B$  で表

される。より高い FOM を得るには試料を多くとるか、検出効率を高めるかして S を大きくすればいい。検出効率を高めるために井戸型計測計を最近購入したが、これは 100keV 領域で 60-70% の絶対検出効率があるから S が大きい。これも一つの方法である。他方で遮蔽も考える必要があって、検出器の材料等、B を下げるための努力が求められる。普通の鉛と、我々が遮蔽に使っている鉛の違いもここに出てくる。(図1) そのように検出器と遮蔽はうまく組み合わせないといけない。いくら地下深いと言っても検出器自体が汚いと使えないのである。このあたりのことは「ぶんせき」(Vol.12, 730-735 (2000)) に詳しく書いてある。

地下空間を利用すればバックグラウンドを下げられるという意味で、他と比較してみると、国内では私が東大原子核研究所時代に使っていた鋸山(35mwe)、大谷(300mwe)、神岡(2700mwe) (比重2.7を厚み1000mにかけると水深換算2700mweとなる)が挙げられる。御母衣(600mwe)は御母衣ダムの下にあって、尾小屋の前はここでやっていた。尾小屋は270mweで、神岡の10分の1だが、何よりも研究室から30分以内で行けるのは便利である。海外の例では、有名なKolarの金鉱が地下3,000m、比重を2.7として8,400mwe相当である。またモンブランの5,000mwe、ハワイ4,700mweもある。さらにフランスのFrejusトンネル(私も行ったことがある)があるが、最近では専らニュートリノ研究に使用されている。最近ではカナダ、ベルギーに300mwe-500mweの地下実験室ができた。そのほか世界の様々な研究グループが1,000-2,000mの大深度で研究を行っている(日本では神岡が2,700mweあるほか、東大宇宙線研がエレベータで20

m降りたところに設置)。尾小屋は小松空港から 20-30 分しかないので、航空機内に生じた宇宙線生成核種を分析することも可能である。他の大深度の実験所はアクセスに何時間もかかるため、こうは行かない。

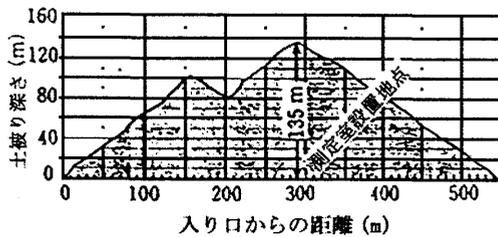


図2 尾小屋トンネルの断面図

図2は尾小屋の断面だが、長さが 546m のトンネル、入り口から 300m 入ったところに測定室が設けられている。土被りが 135m で、花崗岩ならば比重 2.7 だが、ここは凝灰岩で比重が 2 しかないので水深換算 270m となる。ミュオンフラックスは 1/200、中性子は 1/300 に下がる。図3は実際γ線バックグラウンドがどれ位下がるかを示したもので一番上が遮蔽なしの場合である。縦軸を 1 時間あたり 1keV あたりの count にしてあるが、遮蔽しない場合は 100keV から 2800keV までで毎分 2 万 count、尾小屋では 25,641count ある。遮蔽を地上で懸命にやると約 40count に減るが、そのほとんどはミュオンであることが地下測定から分かった。尾小屋測定室内では 1.2count しかない。尾小屋設置の Ge 検出器のバックグラウンド計数を見ると、どの検出器もほぼ地上で遮蔽なしの場合の 2 万分の 1 程度に下がる。買ってから約 5 年程度だが、バックグラウンド計数はだんだん下がって来ている。買った時は飛行機運搬時の影響や、元々入っていた不純物に影響される。この 0.0019cpm というのは 2 count/day にあたる。もう少し下げたいと思うが、0.01cpm 以下の領域ならほぼ満足。う

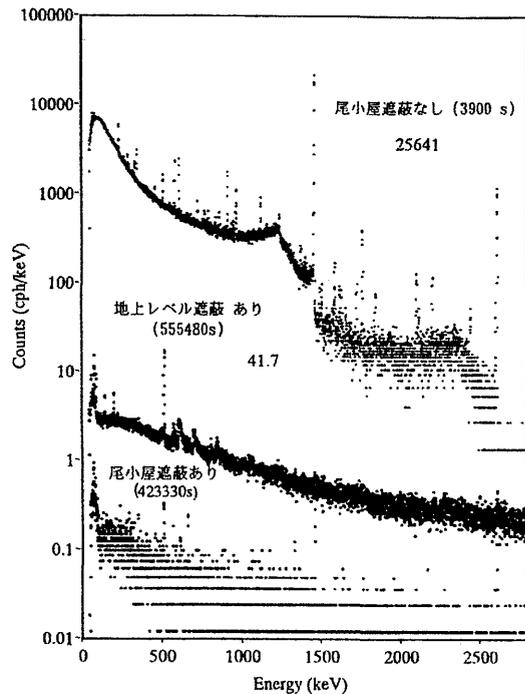


図3 93.5%同軸型検出器のバックグラウンド スペクトル

比較のために縦軸を 1 時間・1 keV 当たりのカウントで表した。  
100-2800keV の計数率：尾小屋で遮蔽なし (25640cpm)、地上測定 (41.7cpm)、尾小屋で遮蔽あり (1.25cpm)

まくいけば 1 count/day の測定も可能かも知れない。1 日遮蔽の中に置いておいたものと外に出した数秒間の被曝とが同じである。実際にガラス線量計もイメージプレートもそうだが、現場に測定装置を持って行きサンプルの取り出し直後に測定しないと何をやっているのか分らない。

図4は他の研究室のいろいろな測定器を比較したもので、縦軸を全部揃えてある。逆同時計測したもの、しないものがある。神岡に大阪大学のグループが設置した検出器よりバックグラウンドが低い、これは空気中のラドン濃度が低く、トンネル内を空気が流れていることと、岩石そのものが放射能の低い凝灰岩であることによる。現

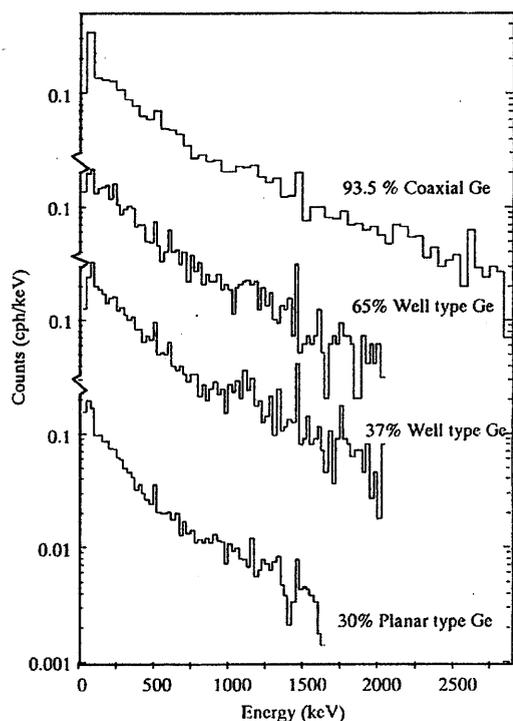


図4 尾小屋地下測定室に設置した4台のGe検出器のバックグラウンド

在、極低バックグラウンド仕様の検出器は4台ある。検出器があるから置いてくれという話なら常に歓迎する。そういうシステムになれば蓄積した遮蔽材も使える。今年度中に65%相当井戸型が2台、Planer50%相当のものが2台増える予定。全部で8台になるが、一研究室が所有する検出器の台数では多分世界で一番になるのではないかと思う。

これらの検出器はどんなことに使えるかというと、核物理、核化学、地球化学、宇宙化学、放射性年代測定、環境放射能の領域などで、今までできなかった仕事ができるようになる。感度が二桁上がり、検出効率が高いので見えないものがちゃんと見えてくる。応用例として $^7\text{Be}$ と $^{210}\text{Pb}$ を測った例がある。尾小屋では $10\text{m}^3$ の空気のろ過でBeを測定出来るが、普通の検出器では1,000

$\text{m}^3$  くらいのろ過が必要である。安全のために $50\text{m}^3$ の空気を吸わせて $^7\text{Be}$ と $^{210}\text{Pb}$ を測定しているが、10分-30分位の時間分解能でこれらの変動を測ることが可能である。これは一日単位で測ったものだが、時間分解能を上げて色々細かいことが言えるようになって来た。これは富士山の山頂で気象研がサンプリングした試料の測定データだが、圏界面(tropopause)の上下に伴ってBe濃度が一桁ぐらい変わる。1時間や2時間の間に急激に変動するのが非常にうまく観察できる。

また、少し新しい領域だが、宇宙線でできる $^{22}\text{Na}$ をトレーサーに使おうという例がある。非常に濃度が低くて大気中のCs濃度と同程度だが、半減期が2.6年なので、10年くらいの水の動きを追跡する際のトレーサーに使いそうであり、地球化学の新しい領域を開く話になる。

#### Detection of $^{134}\text{Cs}$ and $^{137}\text{Cs}$ derived from the PNC accident on Mar. 10, 1997

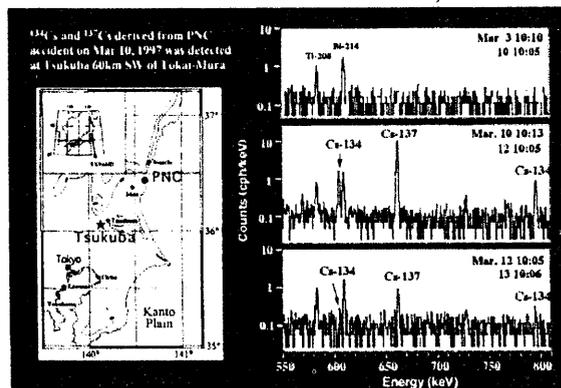


図5

かなり以前のことだが、PNC事故の時につくばの気象研でサンプリングしていると平常値を上回る $^{137}\text{Cs}$ と $^{134}\text{Cs}$ が見えたという。それで大騒ぎになり、見えるはずがないと言われて尾小屋で測ったものである。3月3

日から 10 日まで  $\gamma$  線スペクトルを測っていたが、9 日に事故がおきたので、10 日に急いで止めて測ったら  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{134}\text{Cs}$  が見え、さらに次の日の試料にも残っていた (図 5)。即ち Low level Counting の環境放射能領域ではこういう技術が使えるだろうということが分かった。

また宇宙線に関係するが、今興味を持っているのは環境中性子によって色々な物質が放射化されることである。即ちネックレス一つあればその人が浴びた中性子を測れるということがわかった。これまでに 20 程度の核種の検出に成功しているが、これは低レベル放射能測定に興味ある研究領域の一つである。大部分は n-ガンマ反応によって生成したものである。中性子源とは何かを考えると、ほとんどが宇宙線である。海面高度の flux は 0.008 中性子/cm<sup>2</sup>/s あり、大体 2 分に一個程度通過していることになる。それは金 Au を使って測ると分かる。海拔等も加味しないと解析できないが、研究によっては面白い。1-1.5km 上昇する毎に flux は 3 倍程度に増える。地上ではぐっと下がつて、あたかも地面が吸い込むように見える。

それから放射化の話だが、実際それを測れるとは思っていなかった。たまたま Eu を測ったら妙な物が見えたので、それから色々計算し熱中性子を幾らと仮定するとどのくらいできるかということ考えた。10 年地上に置くとこれらが全部検出出来るようになる。天然の  $^{192}\text{Ir}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{46}\text{Sc}$ 、 $^{134}\text{Cs}$  も検出されている。ターゲット量さえあれば低レベル放射能測定で大抵のものが測れるとい

うことが分かった。金 Au は飽和が早いので使い易いが、イリジウムはとても感度が高い。半減期が長いので、数カ月レベルの中性子の平均フラックスを出すことができる。他にも測れそうな候補は沢山あるが、成功していないものもある。半減期に適当なものを選べば中性子測定は可能だろうと思う。地上はともかく航空機被ばくの線量測定には応用可能だと思う。

これらの研究の出発点は天然の  $^{152}\text{Eu}$ 、 $^{60}\text{Co}$  が発見されたことである。Eu や Co は広島、長崎の被ばく評価においてバックグラウンドになりうるということで色めき立ったが、残念ながら実際やってみると 55 年経過した現在では遠方試料で 10%程度しか寄与しない。しかし環境試料でコバルトが出たといっても天然かもしれないと一応は疑って見る必要がある。原爆被曝試料の  $^{60}\text{Co}$  の理論計算との不一致を天然の生成で説明しようとしたが、うまくいかない。(図 6)ただこの試料をもう一度再測定すると理論計算のラインに乗るかも知れない。

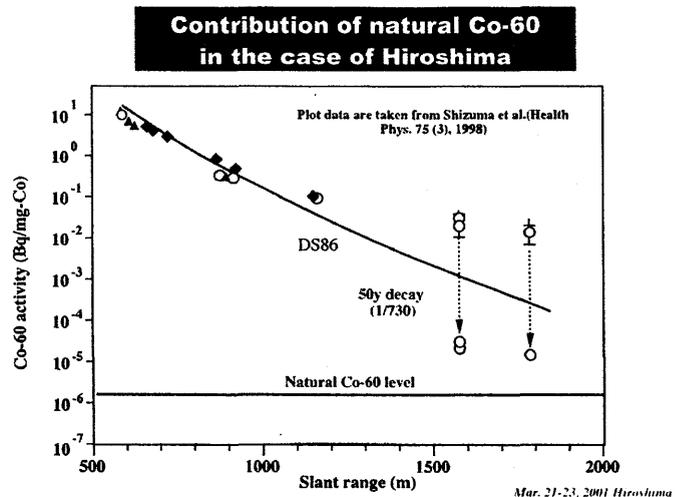


図 6

つぎに金の放射化を利用して中性子を測る話をする。金を用いる利点は小型であること、金 20g もあると良い精度で測れるということである。ネックレス 10g あれば十分である。金は化学的に非常に安定なため、過酷な環境条件でも測定可能である。またカウンターの容積を考えた場合、カウンター測定よりもずっと小さい空間の測定が可能。例として地中や水中などで測ると、水中では表面から 10cm くらいの層が中性子のピークが存在するのが分かるとか、そういうことがきれいに見える。だから種々の放射線の混在場でも中性子を測れる可能性がある。放射化法のもう一つの利点は半減期の異なるものを組み合わせれば中性子の経時変動が分かるかもしれないし、エネルギー情報も得られる可能性があることである。これらは全部尾小屋でできる。金を使って環境中性子のモニタリングに成功した例では臨界事故の環境影響評価、核施設周辺の中性子評価、航空機利用による被ばく評価等があり、スペースシャトル、宇宙ステーション等の環境評価にも使えるだろう。

小松空港からの近さを活かして飛行機実験をしたので、少し説明する。東京-小松便を利用した時や海外に行ったとき、ターゲットをポケットに入れて測っている。30分フライトでは金 Au 等は簡単に測れるが、半減期の長いものは余り出てこない。また飛行コースによる宇宙線強度の違いを確認することができる。例えばカイロ（エジプト）へ行った時とニューヨーク（アメリカ）へ行った時では大分違う。これは面白い領域だと思っている。レニウムはラッキーなことに  $^{186}\text{Re}$  と  $^{188}\text{Re}$  の二つのピークを使うことが出来る。カイロと関西空港間の 10

何時間のフライトで 20g の金属を計測した（図 7）。照射する前に井戸型検出器で測った。レニウムとイッテルビウムの二つを測る。半減期 90 時間のレニウム  $^{186}\text{Re}$  と半減

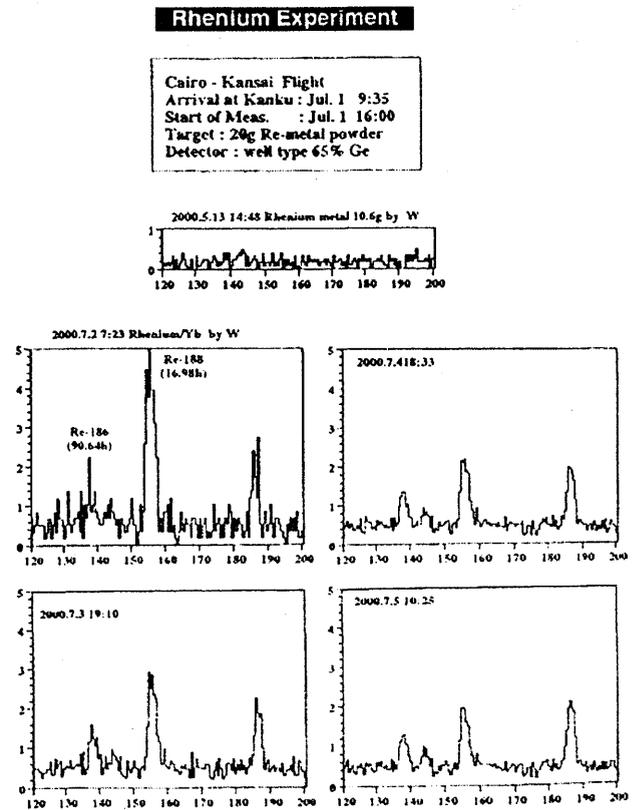


図 7

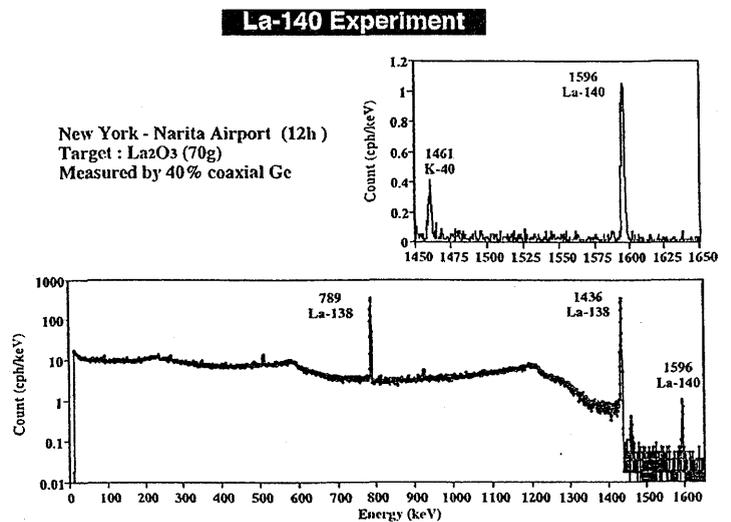


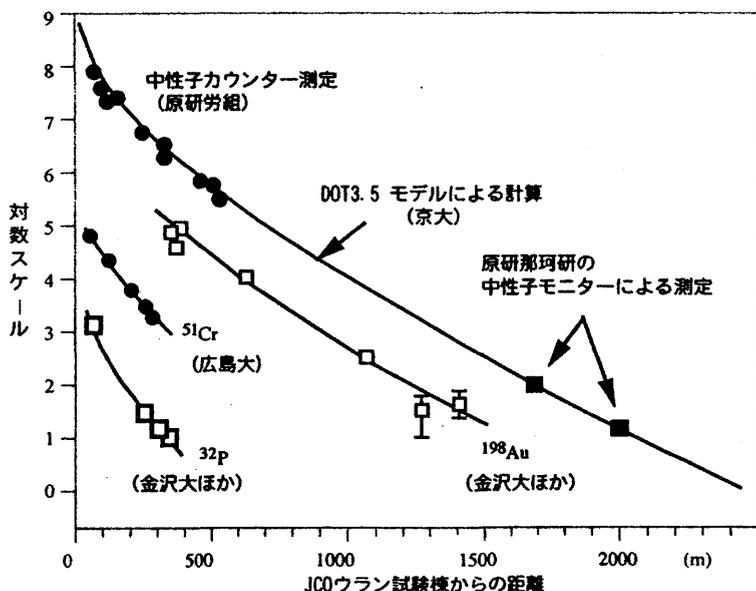
図 8

期 17 時間の  $^{188}\text{Re}$  のピークが見える。レニウムは割に感度よく反応する。 $^{22}\text{Na}$  は半減期が 15 時間なので半日程度のフライトで非常にうまく行った。値段も安いタングステンで  $^{186}\text{W}$  がきれいにれている。この半減期は 20 時間である。ランタン  $^{140}\text{La}$  の例が図 8 である。最初に見つけたのは三沢に飛行機で行ったときのこと、非常にきれいにピークが見えた。この場合はターゲット 70 g を使用した。 $^{140}\text{La}$  はエネルギーが高いので天然の放射性ランタンがあっても中性子捕獲反応で生成したものが非常にきれいに見える。それから次のような応用が結構きくと考えるが、カイロに行った時、酸化ユーロピウムと、 $\text{NaBr}$  を一緒に測った。そうすると半減期 9 時間の  $^{152\text{m}}\text{Eu}$  と 35 時間の  $^{82\text{m}}\text{Br}$ 、半減期 15 時間の  $^{24}\text{Na}$  を一緒に見ることが出来る。こういう組み合わせで、妨害しないターゲットを測定に選ばば色々な情報が得られるだろう。ともかく、いろいろなターゲットを別々に測定しなくても、同時にできるので、中性子測定では効率よく結構

面白いデータが出せるはずである。

図 9 には JCO の事故の際に様々な方法で評価した漏洩中性子の比較をしている。縦軸スケールは任意で相対値を示す。我々は金  $\text{Au}$  でやったが、これはかなり大事なデータと思う。最初に中性子モニターでみつけたのがこの図で 6 桁くらいの範囲が測定可能である。金  $\text{Au}$  試料は、余り近い所から取れなかった。金試料は 2100m まで測定したが、役立ったのは 1400m くらいまでであった。この曲線は理論計算で、相対値で表しているが実測値は計算値によく乗っている。また、リン  $^{32}\text{P}$  は 300m 程度まで検出できた。ターゲットは塩素である。近い所は建物の Shield が効いている。理論計算と実測は合うのが正しいのではないかと思ひ、広島を試料を今再測定中である。検出器のバックグラウンドの問題はどうかとも考えている。

広島、長崎の再評価の問題がそろそろ解決しつつある。環境放射能で一番興味を持



左図は距離依存性を相対的にあらわしたものであり、絶対値ではない。臨界が継続した20時間中に漏洩した中性子による1400m地点の放射性金  $^{198}\text{Au}$  の生成量は環境中性子によって生成する飽和放射能の約100倍に相当します。

1400m地点に到達した遅い中性子の数は  $1\text{cm}^2$  あたり10000個程度と考えられます。

図 9 種々の方法で評価された漏洩中性子の相対量 (線量) の距離依存性

たれるのは、中性子評価に放射化を利用しようと言うものである。そのためには検出器、遮蔽材はふんだんにあるから、当面ユーザーが検出器を尾小屋に置いて試料をここに送る形でやったらどうかと思っている。そしてユーザーは電話回線を通じてスペクトルが見られるようにできたらと思う。共同研究の形でできたら、資金面の解決にもなるし、研究面でも進むと思う。Capacityとしては20台くらいは置きそうである。

最後に、低レベル放射能測定の典型的な測定は事故時もそうなのだが、隕石の測定が一番適当だと思う。1999年9月26日落下の神戸隕石では落下21時間後から測定を開始し、 $^{28}\text{Mg}$ 、 $^{57}\text{Ni}$ 、 $^{43}\text{K}$ が初めて検出された。それに関する取材番組のビデオを見て欲しい。

尾小屋が本格的に測定を始めてから、動燃事故や、JCO事故など事故関係の測定が多いが、スペースシャトルなど宇宙を飛んだ際に積んでいた材料を測ることができたら、様々な情報を得られるのではないかと考えている。

#### 参考資料 (配布)

- 1) 極低レベル放射能測定 小村和久 ぶんせき 12, 730-735 (2000).
- 2) 極低レベル放射能測定の環境放射能研究への応用—金を利用する環境中性子測定 小村和久 利用技術 Isotope News 2000年5月号.
- 3) 訪問—金沢大学理学部付属低レベル放射能実験施設 藤高和信 Isotope News 1999年12月号.
- 4) 極低レベル放射能測定を目的とする「尾

小屋計画」〈1〉〈2〉 放射線科学 Vol.37 No.8 No.10 1994.

- 5) 極低レベル放射能測定最前線 小村和久 放射線 Vol.26 No.3 (2000).
- 6) Natural Radionuclides Induced by Environmental Neutrons, Kazuhisa Komura and Ahmed M. Yousef, Distribution and Speciation of Radionuclides in the Environment, Proceedng of the International Workshop on Distribution and Speciation of Radionuclides in the Environment.(Institute of Environmental Sciences).

#### 【質疑応答】

Q. 尾小屋の湿気対策は、通常の空調で問題なくできるか。

A. 尾小屋のトンネルがだいたい $12 \pm 2$ 度である。測定室の中では20度であるから相対湿度はいつも60%以下になる。測定器自身の発熱によって湿度を50%に抑えてくれる。また、雑音が少なくなるので、測定器の分解能が良くなる。

Q. 宇宙空間の中性子というのはようやく測られ始めたばかり。地上と違ってかなり高いファーストニュートロン(10MeV以上)がかなり多いということがあるが、今まで宇宙で飛んだ素材を放射化分析したという例はないのか。

A. あまり聞いていない。やっても良いはずだが。アメリカが一番入手するチャンスがあるはずである。

Q. 過去にスペースシャトル爆発の事故直前に上げ、事故前に下ろすつもりが、シャトルの事故で3年以上飛んでしまったと

いう、材料実験室がある。その材料実験室は、地上にシャトルを降ろしてきて分析しているのだが、この時はだれも携わっていないかったのか。

A. その頃は尾小屋に入っていなかった。だれか良いデータを持っている可能性はある。アメリカのブレジンスキーのグループがやっていてよいのだが、論文は見えていない。バルーンで上げたものの測定はあるが、本当に宇宙空間を飛んだ物を放射能測定したという話はあまり聞かない。

Q. たとえば、時間的にどのくらい放射化しているか、予測できないのか。

A. 高エネルギー中性子の反応については、これまで測っていない。それでも、例えばこれらを減速させるなどのテクニック使ってやれば可能だと思う。それと放射線の強度が高いので、今まで見えていなかったものが見える可能性がある。

C. 宇宙の話だと特に中性子の線量というのはいまだによくわかっていない。

A. 放射化測定は、中性子でつくられた反応をいろいろ選べるから、そういう意味では新たなデータを出すことができるだろう。

Q. どういう元素ができた、環境放射線がどのくらいかのレベルかなどは、わかるのか。

A. ニュートロンカウンターとしてはできる。そういう意味では、ターゲットが小さいから有用性が随分あると思う。

Q. 宇宙では、あまり測る意味がないのか。

A. 面白いのでやってみたいが、試料の入手先を知らない。宇宙空間で放射線を浴びて放射化したものを測るというプロジェクトはあるのだろうか。とにかく、そういう試料が入手できればいくらかでもやりたいと思う。

Q. 隕石の放射化だが、隕石は飛んでいるわけであり、大気に突入する際に放射化するのか。放射化はどこで起きているのか。

A. 宇宙にいる間にずっと宇宙線を浴びていて、大気に入ってこれが止まる。半減期が短いのは最近の情報、長いやつは相当昔までの情報を持っている。半減期の短いものは一度測ったら、それっきりになってしまう。

Q. 長い間放射化しているのであれば、平衡に達しているのか。

A. 平衡です。半減期一年くらいのだと太陽活動の影響が見える。ショートライフのものだと、過去1週間くらいの情報しか保持されていない。このようなものは一度計測するとそれっきりになってしまい、再度計測を行うことができない。

Q. 放射化は、プロトンがぶつかってできると考えているのか。

A. そうである。プロトンが隕石中に突入して、その際につくられる核種の深度分布が得られている。

Q. 宇宙空間にある場合は、表面をプロトンが叩いているわけだが、落ちてくる途中に砕けたとか、割れたとか、燃えたとか、

熔けたとかとしても、そのようなデータが得られるのか。

A. 焼け焦げ方を見れば、表面が判断できる。

Q. イメージとしてはきれいに落ちてきた場合はできるように思えるのだが。

A. 検出感度が一桁上がれば、複雑に砕けた場合でも、そういう細かい部分が見える。AMS（加速器質量分析器）を使えば、アルミニウム26、ベリリウム10の深度分布が1mm単位で測れる。放射能測定は数字との戦いである。感度がよければ隕石のものとサイズの推定なども可能である。筑波の隕石は3種類あって、一番外側の黒いところ、中くらいに黒いところ、ネズミ色のところ、つまり割れてから大気の摩擦で、発熱がどの段階でおきたかをはっきり示すような黒さの違いがあらわれている。

Q. 先程のお話で、宇宙に上がってから降りてきたもので、試料がほしいという話

だが、そのような試料は、どのくらいのタイムスパンで測定しなければいけないのか。

A. 測定するターゲットによるが、半減期程度かそれより少し長い位までに測定したい。たとえば一ヶ月ぐらい行けば、半減期が数ヶ月のものは、回収してからも余裕がある。短半減期のものは、すぐに無くなってしまうので測定までの時間的余裕がない。例えば筑波の隕石の場合は、測定までに20時間ほどかかっている。

Q. それでは降りてすぐ測らなくて、よいものもあるということか。

A. そうである。アルミニウム26などは、100万年前に落ちた隕石の場合でも測定できる。逆にアルミを測れば100万年前に落ちたものだということがわかる。南極隕石だとカーボン14を測って落下年代を決定している。ショートライフのものは、測定感度が比較的良好という利点がある。

## 「国連科学委員会 (UNSCEAR) 報告から」

土居 雅広 (放射線医学総合研究所)

### 【講演内容】

本日は、第50回国連科学委員会の報告について、宇宙放射線防護に関連して UNSCEAR でどのような課題が要求されているか等についてできるだけ触れながら、話を進めたいと思う。

#### 1. UNSCEAR 設立の経緯

国連科学委員会の正式名称は「原子放射線の影響に関する国連科学委員会」(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) である。

Atomic Radiation というところが、Historical であり、設立当時の1955年、大気圏の核実験による放射線降下物が日本でももちろん、世界中でも問題になり、放射線被ばくの影響が懸念されていた時代であった。国連総会で「原子放射線の影響」という議題について満場一致で採択され、第10回国連総会決議(913X)とされた。これは国連の中でも重いものであって、今でも UNSCEAR の本会議を開く際に読み上げられる。

913Xの中身は、以下のようである。

- 電離放射線の人体と環境に対する影響に関する問題の重要性とそれに関する一般関心が高まっていること
- 短期、長期の影響に関し、放射線レベル、更に放射性降下物をも含めて全ての科学的資

料をできるだけ広く周知せしめるべきであること

- これらの問題の研究が各国で行われており、世界の人々がこの問題について十分に知らされるべきであること
- これらの信念に基づき、加盟15カ国(現在は21カ国)からなる科学委員会を設置し、且つこれらの政府に対しこの委員会において自国を代表する科学者1名を適当数の代表代理および顧問等とともに、指名するよう要請する。
- この科学委員会には国際連合加盟国又は専門機関加盟国より提供される「あらゆる電離放射線源からの被ばくがヒトの健康と環境に及ぼす影響についての資料」を受理、収集整理し、有効な形にまとめることを要請する。
- (我が国が当時国連加盟国でなかったという事情により) 事務局長に対し、特に日本政府が委員会の科学者代表1名を適当な代表代理および顧問とともに指名するよう勧誘することを要請する。

これを受けて、1956年ニューヨークの国連本部で第1回国連科学委員会が開かれた。日本政府代表は日赤中央病院長であり、東大医学部名誉教授でおられた都築正男博士であった。国連未加盟という状況下における、国連からの要請ということで、日本国内の支援体制にも熱が入っていた。日本学術委員会と原子力委員会の全面的支援のもと対応が協議された。さらに外務省国際協力局、科学技術

庁原子力局が協力して支援するという国を挙げての支援体制だった。

科学委員会事務局は、分野ごとに複数の科学担当官（コンサルタント）が任用され、各国から提出される資料のとりまとめが行われた。これについては、現在も全く同じ方法が執られている。

## 2. 都築正男回顧記録にみる初期の UNSCEAR

1958年の報告書がまとめられるまでに、5回開催された委員会会合については、都築先生が回顧録を多く書いておられる。以下に述べるのは、そこからまとめたものである。

この時の、Hammar skjold 国連事務総長の開会挨拶には、「この科学委員会は非政治的なもので、原子放射線が人体とその環境とに及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、科学的正確さをもってそのリスクを示すとともに、不当な恐怖を和らげることを期待し、既に得られている資料を収集して公表するだけでなく、科学の進歩に則して、さらに放射線が人体に及ぼす生物学的影響を研究すべきである。」とあり、当時すでに環境という言葉が出ている。

また、報告書の基本的な方針として、報告書は国連総会へ提出するものであるから、専門的技術的に偏らないように注意し、一般的に理解し易いよう記述すべきこと、科学的に一致しない事項がある場合には、一致しないことを認めたことを明らかにし、「科学的資料」と「科学的考察ないし結論」との区別を明らかにし、単に安全であるとか、安全でないという表現は用いないこと、国際放射線防護委員会とは違い、あるべき防護基準（線量限度等）については検討の埒外とし、あくまでも科学的な議論を経て集められたデータをまとめるというものが役割と議論された。

なぜそのような議論がされたかという点、

核実験データを要求できるかという議論が相当な時間にわたり交わされたことによる。放射性降下物の根本的な基礎データである「核実験に際しての放射性降下物の生産量」について、正確な資料の提出を国連事務局を通じて要求して良いものかどうか、について相当議論がされた。核実験をしている国の代表は、このような資料の提出を要求するのは「政治的」意味を持つという考え方に立ち、それ以外の国の代表はこの要求こそ真に「科学的」であるという考え方に立った。この2つの考え方をめぐって会議が紛糾し、結局、字句としては表現しないけれども国連総会がこの問題について重大な関心を持つように希望するという趣旨を報告書中に反映させることになった。

また、冷戦下の軍拡競争の狭間で、極めて微量でも放射線は生物に影響する可能性があると考えられる生物学的考察と、われら人類の環境が放射能によって汚染される（核実験放射性降下物による環境汚染）状況が増強されつつある物理学的考察とをどのように報告書に織り込むかということや、原子核兵器の爆発実験によるものは、一度打ち上げられた以上は人力で制限調節することはできないし、かつその影響を受ける人々の数は多いといった議論がされている。この辺りの議論は、当時の放射線の健康影響に対する社会的不安を反映している。

さらに、国際的な強調・妥協と科学についても議論されている。結果として、地球上の人類が等しく影響を受ける原子核兵器の爆発実験に基づく放射性物質は、直接は何ら人類に幸福をもたらすものではないから、その増量は極力防ぐ手段を講じるべきであるとの考え方に概ね到達した。

しかし、これらをどのような表現によって報告書に書き表すかについて紛糾し、5週間

にわたり昼夜兼行で討議がなされたが、会期中の第4回までには決定できなかった。都筑先生の回顧録にも、「報告書の草案は骨組みも肉付けも終わった。細目の討議を繰り返しても果てしがたい。関係者一同、精神的にも肉体的にも疲労その極みに達したように考えられ、一同帰国して、ゆっくりとできあがった草案を眺めてみることにした。」と実感のこもった記述がある。

都筑先生の回顧録にも書いてあるが、「たとえ科学者のあつまりであるとはいえ、祖国を異にする人々が政治的雰囲気のみなざる国連の一隅で国際的関心のもたれている事項について話合うのであるから、うまくいくかどうか心配していた。」そして、実際に「国際情勢の渦がまいている国連の内での会議のこととて時に話し合いがもつれかけたこともあった。」「が、各国の委員がいずれも科学畑であるので話し合っているうちに、比較的穏健な科学的考え方へ落ち着いていくことが常であり、心配は杞憂であった。」という。

また、我が国の科学者の貢献について都筑先生の回顧録より抜粋すると、「当時国連加盟国でなかったにも関わらず、特に要望されて委員国に我が国が加わった理由については、何ら公文書等に記載がないので想像するしかない。」「我が国の科学の寄与が国連科学委員会の事業達成上、必要であるとの考え方が関係者にあったこと」、「その期待に応じて22篇の報告資料を提出するなど、我が国科学陣の努力により、米国、英国、スウェーデン等と比肩するようにして渡り合えたこと」、「アジアの国々の生活状況を反映した報告資料が我が国から提出され、これらが科学的に価値のあるものとして報告書に採用されたこと等大きな成果を上げた。」と述べられている。

この点について考えると、最近では UNSCEAR のデータは欧米中心に偏っているように見受

けられる。アジア、中東地域のデータもきちんと取り扱えるようにしていかなければいけないと感じる。

### 3. 国内の放射線影響研究体制

一方、日本国内の動きについて見てみると、次のようになる。

#### 1957年 放射線医学総合研究所設立

(1960年の第7回国連科学委員会会合における塚本憲甫・日本政府代表以降、国連科学委員会の日本政府代表には、歴代の放医研所長が就任、重責を果たしてきている。)

#### 1958年 日本学術会議の放射線影響調査特別委員会「原子力時代の人類への放射線影響に関するシンポジウム」が契機となり、翌年放射線影響学会設立。

#### 1960年 日本学術会議放射線影響調査特別委員会と原子力委員会放射能調査専門部会とで、「国連資料小委員会(委員長・塚本憲甫・日本政府代表)」を組織。

国連科学委員会資料小委員会は、付属書ドラフト毎に作業グループを構成し、関連資料の収集を行いながら、付属書ドラフトについて専門的意見をとりまとめ、1962年報告書(第二次総括報告書)の作成に貢献している。1962年報告書は、1958年報告書の約2倍の440頁にもなり、内容も充実したものであった。

「国連科学委員会資料小委員会」は、その後放射線医学総合研究所に設置された「リスク委員会」が継承し、付属書ドラフト毎に関連資料の収集を行いながら、付属書ドラフトについて研究所内外の専門的意見をとりまとめ、これらを国連科学委員会事務局に提出する、または代表が会議に臨むという形で役割を果たしてきた。

#### 4. 国連科学委員会 2000 年報告書

線源篇、影響篇の2分冊で構成され、読むのに苦勞するほど1200ページと膨大なものである。第49回の会合で承認された。

本報告書では、近年の放射線影響研究の著しい発展を反映し、

- 自然・人工放射線源（航空機乗務員の被ばく）
- 医療放射線・職業上の放射線からの被ばく
- 放射線発がんのメカニズム
- 低線量放射線の生物学的影響
- 放射線と他の物質との複合影響
- 放射線によるがんリスク、およびチェルノブイリ事故による被ばくと影響

について膨大な科学的知見を集大成したものである。遺伝的な影響については、まとめることができなかった。

一部概要について紹介すると、

● 広島・長崎の原爆被爆生存者の健康影響調査を基に、致死発がんリスクを、放射線被ばく（低 LET 放射線）1Sv あたり、固形がんで男性9% ( $9 \times 10^{-2}$ )、女性13% ( $13 \times 10^{-2}$ ) と推定された。

● 長期慢性的被ばく（chronic exposure）の場合には、リスク推定値を50%低減（uncertainty factorに2を充てる。）

● ラドンの濃度—線量換算係数は1993年報告書の係数を採用。疫学的アプローチと線量推定モデルによるアプローチの推定結果の不一致については、最後まで議論になったが、再評価するという条件で決まったものである。

● 航空機高度による被ばくについては、線源篇の付属書B, 31-42ページに記されている。

温帯緯度での高度 9-12km → 実効線量率  
5-8  $\mu$  Sv/hr（欧州～北米線 30-45  $\mu$  Sv）

赤道緯度での実効線量率 → 2-48  $\mu$  Sv/hr

超音速飛行体高度 ~18km → 10-12  $\mu$

Sv/hr

年間飛行時間：non-fliers (0hrs), occasional fliers(3-50hrs, ave.10), Frequent fliers (50-1200hrs, ve.100), crew members (300-900 hrs, ave.500)

というデータがまとめられている。また、計測による方法、計算による方法、更に様々な測定法や計算上の問題についても記述化されている。これらについて、ドラフトの段階でわが国において十分なコメントや研究データの収集や追加ができたかについては、取りまとめを行う放医研リスク委員会の責任を再度見直して、今後十分な対応ができるようにしていかなければいけないと感じる。

生物関係では、 $\gamma$ 線と中性子線、高 LET 放射線（ $\alpha$ 線）の線量効果関係、Co-60 照射によるマウスの骨髓球様白血病（myeloid leukemia）の線量効果関係モデルなど、様々な線量効果関係についての記述がある。

今回の会議でも、発がんメカニズムやリスクの評価に当たって、様々なモデルの適応について懸命な議論がされている。UNSCEARは、何か結論を出すところではないが、科学的知見を参照する上ではいろいろなデータが集約されている宝の山と言える。しかし、一方で、何でも載っているということで要点がつかみにくい面はある。

#### 5. 2001 年度国連科学委員会 各国（機関）代表

各国代表メンバーは以下のとおりである。なお、最近、UNSCEAR のホームページ (<http://www.unscear.org>) が立ち上がり、過去の報告書等が参照できるようになる予定なので、活用していただきたい。

アルゼンチン(1955)	D.Beninson
オーストラリア(1955)	P.Burns
ベルギー(1955)	J.Maisin
ブラジル(1955)	J.Lipsztein

カナダ(1955)	R.Chatterjee
中国(1986)	Z.Pan
エジプト(1955)	A.M.El-Naggar
フランス(1955)	J.F.Lacronique
ドイツ(1973)	C.Streffer
日本(1955)	Y.Sasaki
インド(1955)	K.Sainis
インドネシア(1973)	K.Wiharto
メキシコ(1955)	欠席
ペルー(1973)	L.Pinillos-Ashton
ポーランド(1973)	Z.Jawarowski
ロシア(1955)	L.Ilyin
スロバキア(1955)	D.Vitory
スーダン(1973)	K.E.H. Mohamed
スウェーデン(1955)	L. E. Holm
英国(1955)	R. Clarke
米国(1955)	F.Mettler
国連科学委員会事務局長 (50回から)	Norman Gentner
国際放射線防護委員会	J.Valentin
国際原子力機関	V.Cserveny, S.Groth, A.Wrixon
国際放射線単位測定委員会	A.Wambersie

第50回会合日本代表団の構成は下記である。分野的には多少問題があると感じたが、これについては後で説明したい。

日本政府代表

佐々木康人

(放射線医学総合研究所・理事長)

アドバイザー

佐藤弘毅 (近畿大学生物理工学部遺伝子工学科教授)

吉澤道夫 (日本原子力研究所東海研究所保健物理部)

浅野智宏 (核燃料サイクル開発機構安全推進本部)

土居雅広 (放射線医学総合研究所放射線安全研究センター)

文部科学省科学技術・学術政策局原子力安全課担当官 (欠席)

## 6. 国連科学委員会 2001年報告書

第50回の会合(2001年4月)で承認された。

科学担当官 K. Sankaranarayanan 教授(オランダ・ライデン大学)が最初のドラフトを書いて、1995年以来検討されてきた「放射線の経世代影響(ドラフト R613)」が承認された。以前には推定されていなかった多因子性疾患と先天異常の経世代影響を推定しているのが特徴である。

倍加線量の算定に当たって、ヒトの自然突然変異率とマウスの放射線突然変異誘発率を用いるべきか、どちらもマウスのデータを用いるべきかについて、議論が紛糾したために、UNSCEAR に出席していない10名の遺伝学者に論評を依頼した。その結果を踏まえ、倍加線量法の採用において、ヒトの自然突然変異率とマウスの放射線突然変異誘発率を用いる方法を採用することでまとまった。

最近の推定に従って、ヒトの遺伝子数を26000-40000に変更し、経世代影響として、初めて遺伝と環境が関与する多因子性疾患の評価がなされた。

被ばく後の第1世代の経世代影響の全リスクとして、1グレイ(Gy)あたり0.3-0.5%、倍加線量はおよそ1グレイ(Gy)とされている。

最大の調査集団の一つである日本の原爆被爆者の子供たちには影響がないということは明確に書かれている。比較的大きなヒト集団でも、中程度の急照射被ばくではほとんど経世代影響がないことも併せて示唆している。

ただ、動植物実験では、放射線は経世代影響を誘発することが書かれている。

多因子性疾患についても細かく解説しているが、ここでは細かく触れない。近く報告書

が出るので参照していただきたい。

国際放射線防護委員会 (ICRP) の 1990 年勧告でも、

- ・ 原爆被爆者追跡調査では放射線による遺伝病の発生はない。
- ・ 倍加線量は動物実験などから 1Gy と推定。
- ・ 被ばく後 5 世代の継世代影響の名目的致死確率係数は、放射線被ばく 1Sv あたり作業員 0.8% ( $0.8 \times 10^{-2}$ )、公衆 1.3% ( $1.3 \times 10^{-2}$ ) と推定される。

といったように、似たような記述になっている。

## 7. 第 50 回国連科学委員会会合

2001 年 4 月 23 日から 26 日オーストリア・ウィーンで開催された。

2000 年報告書の次の報告書を 4-5 年後に刊行することを目指し、今後どのようなテーマについてどのような方向でとりまとめを行うかを中心に検討した。「放射線の経世代影響」のドラフトは、今回の会合で合意、2001 年報告書として刊行することが承認された。

生物分野の今後取りまとめるテーマは、以下のようである。

①人体組織における放射線応答の機構と影響 (特に重粒子線等の健康影響について)

まず、宇宙空間での影響についてデータを集めるべきだと佐々木代表が発言した。他国代表からは、重要性は理解するが次の報告書までにまとまるかどうかは疑問だという反応だったが、ドイツの代表より、宇宙に限らず診断治療に使われるのでデータを集めることは必要という意見がだされ、ドラフトに載せる方向となった。

②バイスタンダー効果、遺伝的不安定性およびアポトーシス等の分子細胞レベルの新しい知見について

とくに発がんのメカニズムに関連すること

についてとりまとめを行う。

③放射線誘発がんの疫学的評価

④がん以外の疾患の疫学的評価と線量応答

これは広島長崎の被爆者に心臓疾患などがん以外のデータが出ていることに関連する。

物理分野の今後取りまとめるテーマは、以下のようである。

①物理分野全体の総括的なまとめ

②被ばく源 (自然放射線、人工放射線および職業被ばく) に係わる情報の集約

特に航空機乗務員、旅客、高高度飛行体乗員などの被ばくの実態について情報を集約しようということになった。

③医療被曝に関する情報の集約

④ラドンの線量評価

⑤放射線の環境への影響

これは人以外の環境や生態系への影響を指している。これについてはまだ難しいのではという否定的な意見がかなり出たが、カナダとドイツの代表団よりできるだけ努力をするということ、無理に報告書にはしないと条件で、取り組みが決められた。

ここはポイントだが、ドラフトの対象課題の検討においては生物分野と物理分野との一連の連携の下で進めるべきという点が強く議論された。現在の分冊のような Source and Effect から、Source to Effect にしようじゃないか、この点を心掛けていこう、ということが主張された。そして上手く行っている例としてラドンの例が言及された。宇宙の研究についても物理的な線量評価だけでなく、そこから影響へつながる形で全体を意識してとりまとめをしていくというのが、これからの方向であろう。

## 8. チェルノブイリ事故の健康影響

ちょうど事故の 15 周年目 (4 月 26 日) に議題として取り上げられ、多くの取材も入

ったことである。

2000年報告書を国連総会に提出した際に、ウクライナとベラルーシが国連科学委員会に関する国連議定書に反対する意向を示した。理由は両国の専門家が取りまとめに十分関与していなかったこと、そのためそれぞれの国の研究成果が十分に取り入れられておらず、付属書の正確性が疑問視されるとの抗議がされた。そこで今回の会議においてもL.A.Ilyn博士（ロシア政府代表）がチェルノブイリ事故による健康影響の検討を行う際に、ベラルーシの専門家を会議に招聘したい旨を提案されたが、国連科学委員会は国連総会で承認された委員国によるクローズな会合であり、その他の国の招聘はできないと異議があった。これを受けて、国連科学委員会の正式な会合としてではなく、非公式の「セミナー」を開催して、ベラルーシ専門家を招聘した。

## 9. 国連科学委員会会合の印象

国際会議での国（政府）の思惑と科学者の立場が混在しているという印象だった。

国連科学委員会は、設立当時（1955年）は人為的に制御の困難な環境汚染源と想定された核実験による放射性降下物（フォールアウト）をめぐる、実験データの公開は政治的に微妙な問題を含んでいた。

第50回会合（2001年）においては、チェルノブイリ事故による影響の推定が、国際的な損害賠償問題などの複雑な政治問題に抵触していた。

放射線被ばくによる直接の健康影響だけではなく、心的外傷後ストレス障害（PTSD）等を「チェルノブイリ事故による身体的影響」に含めるかどうかの点については冷静な科学的論議が必要である。小児の甲状腺がんについてはIAEAでも決着がついているが、PTSDも含めてそれ以外のがんについての取扱は難

しい。

「核実験の放射性降下物」から「チェルノブイリ事故影響」へと、対象は時代毎に変わっている。

しかしながら、放射線の影響について正確なことを知りたいという世界の市民の要請は、国連科学委員会が設立された当時に劣らず切実である。国連総会加盟国の政府代表は、その背後には非専門家の各国の国民がおり、報告書を非専門家に理解できるようにすべきであるということが、各国政府代表から異口同音に述べられたことには救われる想いがした。

Lars-Erik Holm博士（スウェーデン）らから、物理分野の線源データの蓄積を今後はインターネット等で収集・集約し、会合では、検討すべき課題に討議を集中すべきであるとの提案がなされた。インターネットの有効性は未知数だが、研究情報の収集に追われるのではなく、データについてもっと討議をすべきということであれば、一つの選択肢ではないかと思う。

## 10. 国連科学委員会への対応体制

国連科学委員会における日本代表団への期待は大きい。広島・長崎の原爆被ばく生存者の健康影響調査、笹川プロジェクトを筆頭にチェルノブイリ事故関連の国際協力、国際共同研究の実績から大きな評価をされている。代表団の中でこの辺をきちっと説明できる人材を含めるべきだと痛感した。

さらに、これまでは、放医研のリスク委員会が、付属書ドラフト毎に作業グループを構成し、関連資料を収集し、付属書ドラフトについて専門的意見を取りまとめるというスタイルで対応してきた。届けられるドラフトに対して修正コメントを出すという形では、ややもすると受動的な対応になってしまう。むしろ積極的にドラフトを書いた方がよいので

はないかと思う。ドラフトの書き手となる科学担当官や、それをサポートしていく体制を整えて、日本から情報と学術的主張を発信していくことにより、実質的な貢献度を高めていけるのではないかと考える。

付属書ドラフト毎の討議においては、原爆被ばく生存者の健康影響調査研究者やチェルノブイリ国際研究協力プロジェクト関係研究者、ここにお集りの方々のような環境放射線源（宇宙放射線等）の研究者、ラドン、医療被ばく研究者、生物影響研究者など、多方面からの参画が不可欠である。

国連総会議定書（Resolution）に基づく、国連科学委員会の日本政府代表を支える体制の確立が必要であり、日本代表団の構成についても見直し、必要に応じて評価していくことが求められる。こうした対応をとりながら、放医研として、リスク委員会に代わる何らかの体制を整えていくべきであると考えている。

#### 配付資料：

- 1)第50回国連科学委員会(UNSCEAR)報告
- 2)第50回国連科学委員会(UNSCEAR)会合に出席して 放射線科学 Vol.44 No.8 2001

#### 【質疑応答】

Q. ドラフトの担当者というのはどのように決まるのか。担当者によってかなり色がでるのか。

A. 今回連れてきている人もいるが、2001年の集まりの時はまとめを事前に書いた人がいて、例えばラドンだったらナオミ・ハーレーさん。各国政府が、このドラフトについてはこの人が良いのではないかと推薦する。ラドンで言えば、今ソロモンさんとハーレーさんが推薦されている。彼らが受け

てくれたら、二人が書いてくれることになったというアナウンスが流されて、ドラフトが書かれることになる。

Q. 会議の中で指名されるのか。それが記録に残るのか。

A. 記録には残らない。

Q. どの国が担当するか決めるのか。

A 事務局長が基本的にドラフト起草者を選任、任免する。Gentner に対して各国代表団が今度このドラフトをつくることになったと報告する。書く人は各国から推薦を受けて、Gentner が適当な時期に適当な人に委嘱する。日本から各課題について誰かを推薦するという話はないが、してはいけないことはない。会議当日、起草者は前に座り、やりとりが必要であるためかなりの語学力が必要となるが、やる気と能力があればできないわけではない。

C. 国内でコメントを募集すると、いろんな人が送ってくるが、中には単に論文の束を送ってきて、これだけありますからあとは適当にまとめてくださいということが多い。それでは困る。重要な部分にアンダーラインを引いて、どの部分をどういう方向でまとめるのか、そこまでしてほしいと思う。

A. 同感である。UNSCEAR から依頼が来るとコメントしなければという、言葉は悪いが雑用の延長のように捉えられがちである。今までは上手にアプライしてデータを反映させていくことによって、相対的な研究価値などを認めてもらい、国際的な議論の中で研究者が出すデータの位置づけを決めていくことが重要と認識されていた。今はそ

ういう作業が評価されない。研究者は論文を書いてさえいけば、あとは誰かが認めてまとめてくれるのではというところがあって、こういう態度だと日本のデータは少し後手になる可能性がある。もちろん立派な仕事だと誰かに引っ張り上げてもらえるが、自分の身の回りにいる人たちから情報を集めるのが人の常であり、どなたがコンサルタントになるかによって集まる情報に偏りが生じることもある。これは是正しなければならない。参加する国の代表団やリスク委員会の担当者が汗をかかなければならない。研究者のドラフトに対する意識を少し上げてもらい、載せてもらうためには論文だけ送り付けでもだめで、文章の中でこの仕事はこういう位置づけにあってこういうことが大事であるということを書き添えて持ってきてもらわないと、なかなか採用されないということも含めて、研究者に情報をきちんと流すようにしないといけない。今までは、何となくドラフトを送って、コメントあったら下さい、関係する論文があれば送ってくださいという対応で、対応する側も十分な対応ができていなかったように思う。とりまとめる側にしても少し急な話ではある。3月下旬に分厚いドラフトがきて、返答期限は4月中旬である。このドラフトにコメントせよと言われても早々すぐにはできるものでもない。そういう意味でも、コメントを採用してもらう為にはある程度きちんと文章を書いてもらう方がよい。

放医研に国際部門ができて、外務省などとのやりとりは前に比べると、かなりやりやすくなった。安全研究センターもできたので、センターとして今まで以上にまとまった取り組みができるのではと思う。所内でできるだけ仲間を募って協力しながらやっ

ていきたい。また、外部の方にも十分な理解をいただきながら進めたいと思う。この委員会で聞いた話も、UNSCEAR の現場ではあまり知られていない。小村先生の話等も自分は知らなかったが、こういう情報をまとめて UNSCEAR に持って行けたら日本ではこんなきちんとした研究が行われているのかという理解が深まると思う。日本の研究成果は、大事にはされているが、議論が始まると英語の問題などもあって少し脇にやられるところがある。このため、会合に出席する前にきちんとしたものを用意していく必要がある。

Q. IAEA ではよく専門家のミーティングやシンポジウムが開かれるが、そこで集まった情報は UNSCEAR に採り入れられるといったつながりはあるのか。

A. ある。IAEA の会議には、原則として Gentner がオブザーバーとして出席している。

Q. 外務省を通してよく案内が来るが、ああいう案内にはできるだけ答えた方がよいのだろうか。

A. そう思う。ICRP も UNSCEAR も裏では皆繋がっていて、重複して仕事をしている人が多い。そのため、ロビーで雑多な話をしていっているうちに物事が動くようなところがある。何となく会議に出ているだけで、いつの間にかその流れに流されてしまうことがないこともない。これではいけないので、UNSCEAR ではサイエンスのセンスできちっとおさえしていくことが大切。

例えば、本委員会の話に出ていた中緯度地域における線量幅であるが、UNSCEAR で幅

をいくらと決めるわけではないけれども、その幅が他の数値と比べて妥当なのか、評価の仕方に問題はないのか、といった細かい点まで詰めることは多い。この辺りをきちんととりまとめていくことが必要かと思う。

Q. 行政ないし外交メンバーに想定される具体的役割とは何か。

A. 例えば、原子力発電所のデータについては、経済産業省などいろいろなところに行かないとデータとしてまとめられないものがあり、それらを集めるのに役所が主導してくれないと、研究者だけではなかなか対応できないものが結構ある。こうした行政ベースで集めるべきデータは少なくない。また、安全規制サイドから UNSCEAR に協力してもらうための舵取りをしていただくことが必要である。また、日本のシステムで合わな

いところ、例えば、医療被ばくの種類は日本では一項目だが、外国では、看護婦、患者、付き添いに区別されている。厚生省の良いデータベースがあっても、このように分類が違ってそのまま提出できないことがある。こういう点は直していかなければいけないが、法律で決まっているものを変えるのは容易ではない。この点においても、やはり役所の対応が必要である。

C. 積極的な関与が大切なこと、今後体制づくりが必要なことはよく理解できた。そのためどう対処するかは放医研だけの問題ではないが、放医研が大きな部分をサポートしていかなければならないことも事実だろう。中でも安全研究センターの役割は大きいと思う。そういう認識の下に、研究所としてどういう体制で臨むかを明確にすることが非常に重要であると考えている。



## 「工学リスクと健康リスクについて考える」

甲斐 倫明 (大分県立看護科学大学)



### 【講演内容】

私自身は直接宇宙放射線を研究しているわけではないが、普段はリスク評価、特に発癌の数理モデルをつくることであり、疫学と生物とをつなぐための数理モデルを研究している。最近低線量の問題をどう考えるかを考えており、今日はそれに関連して話題提供をさせていただきたいと思う。

#### 1. 低線量リスク問題のポイント

低線量の問題という時、専門家の意識としてサイエンスとレギュレーションが統合していない、一貫性がないという意識を持っている専門家が皆ではないが多いことは事実だ。分かり易くいうと、リスクに見合わないコストをかけているのではないかという意識が強い。特にチェルノブイリ以降この考え方が強く、原子力が下向きになってきたのと並行してこうした議論が世界的に起きているのではないかと思う。その結果として、各国で低線量に関する様々な議論やシンポジウムが行われている。社会の方の意識はどうかという、リスクという言葉の持っている意味、リスクという危険だと理解してしまうために、安全とリスクというものが対立するようなイメージでとらえてしまう。そういう混乱があり専門家の方もなかなかリスクについて真正面から説明したり議論したりすることがない。むしろリスクという概念自体を避けてきたのではないか。原子力分野においても、事故は起きないということでリスクなど議論しよう

としなかった。規制者や利用者側にとって、社会はリスクを理解できないという意識が強かった。そうこともあって事故が起きる度、社会は不安になり、放射線に対して怖さを感じる。不安感が増大すると行政はより厳しい規制をすることになる。たとえば 99 年の JCO の事故ではご存じのように、中性子が問題になったために中性子モニタリングを事業所の外でしなければならないなど、あまり科学的でないことが行われたという現状がある。

#### 2. 解決に向けた課題

こういう現状がある時、これを解決するために専門家として二つ努力しなければいけない課題があると考えている。一つは Risk Characterization と公衆との対話、つまりリスクというものをもっと積極的に社会に対して説明をしていくことである。リスクとは何なのか、放射線のリスクはどの程度、何がわかっていて何がわかっていないのかを説明するということ。Characterization というのは、化学物質のリスク管理に使われている用語で、リスクの総合評価や総合判定と訳されているが適訳ではないと思っており、あえて訳していない。リスクを Characterize する、特徴づける、放射線のリスクとは何か、被ばくしたらどうなるのかをきちんと説明することは大事だと思う。もう一つの課題はこれと同時に放射線リスク評価の科学的信頼性をあげるということである。この委員会の方々には物理や生物というアプローチで信頼性をあげるための

努力をされているわけだが、それだけでは問題は解決しないと思う。信頼性は時代と共に変わっていくが、前者はその時その時に説明をしていかなければならない。将来わかるまで待ってくださいでは困る。二つの努力を並行して行わなければならない。

### 3. リスクとは？/歴史的なリスクの概念

そこでリスクとは何かということで、演題に健康リスクと工学リスクというタイトルをつけた。地球外で宇宙放射線で被ばくをするといったとき、宇宙放射線に被ばくすることによるリスクは、いわゆる健康リスク、健康上の損失を被る可能性という形で理解されているだろう。疾病の罹患率で考えていることが多いと思う。一方、工学リスクは、例えばチャレンジャーの爆発事故のような被害を想定して、人工構造物の損害の期待値と考え、損害が起きる確率に損害が起きた時の損害の大きさの積として捉えている。工学リスクは損害の期待値として理解されている。宇宙線に関しては、健康リスクと工学リスクの二つが問題となる。

リスクの意味について歴史的に遡ると、損害発生の確率や可能性を問題の中心に議論する説と、予測が困難で予測がはずれてしまうという不確実性に焦点をあてた二つの考え方があった。

リスクの語源はラテン語「To navigate among cliffs」であり、座礁や沈没の可能性を考慮して航海に出ることで、その際に使われたのがリスクという概念だったようだ。日本語の「危険」に近い英語の Danger は、対象や状況に主な原因を帰す、たとえば崖は崖という状況そのものを原因として生じるものであるのに対して、Risk という概念そのものは歴史的にみると、対象に対して挑む行為が、つまり人が崖に近づくという、人の方に、行為を行う側に原因を認める概念である。別の言い方を

すれば、Danger というのは安泰志向、Risk は安全志向である。このように考えると、Risk は安全と密接な関係があり対立するものでない。リスクというのは行為側に原因を求めるもの。航海しなければリスクはない。このことから、本来地震や台風などの自然災害はリスクとは呼ばない、地震リスクという言い方もあるそうだが、呼ぶべきものではないことになる。

下記はカミングムという人が提案しているリスクの捉え方である。

$$\text{Risk} = \text{Uncertainty} + \text{damage}$$

$$\text{Risk} = \text{hazard/safeguard}$$

危険というと、Damage (被害) を想定するが、damage だけではなく、予測に伴う不確かさ、damage が起こるかどうかわからない不確かさとの和で考える。また、hazard があると、社会にはそれに対してなんらかの safeguard がある。safeguard が大きいほどリスクは小さいことになる。こういうイメージでリスクを捉えるべきであるとしている。

期待値ではなくリスクカーブで捉える

ところで工学リスクは事故が起こる確率と損害の大きさの積でリスクを測るが、この考え方では、確率は低い、発生したら損害が非常に大きいものと、頻度は高いが結果は非常に軽微なものと区別がつかなくなってしまふ。これは昔から議論されてきた問題である。リスクは {シナリオ、確率、影響} のセットとして捉え、さらに単なるかけ算ではなく、リスクのカーブで捉えるのが、原子力発電の工学安全性を考えるときに行われている理論である。

### 4. シナリオの不完全性

ここでいつも問題になるのはシナリオの不完全性である。昨年 9 月 11 日の同時多発テロでは、2機の飛行機がぶつかって世界貿易センタービルが崩壊することを誰も予想して

いなかった。ビル建築にあたってあのシナリオは入っていなかった。シナリオが入っていたら、それに対する防御がありえたのかもしれないが、入っていなかった。事故には必ず想定外のシナリオがつきものである。JCOの事故も、今回の同時多発テロもそうである。そうするとリスクというのは常に不完全なものでしかない。シナリオに想定外を含めた形で考えるしかない。言うは易いのだが、実際にこの想定外の N+1 のシナリオをどの程度の Probability で考えているかがいつも問題になる。これはチャレンジャーの時もそうであったらしい。問題を指摘した専門家もいたが、NASA はそういう確率は小さいとみていた。シナリオの不完全性をどう捉えていくのかは、一般論では議論できないが、いずれにしてもこういう問題がリスクにはつきまとう。

## 5. 新しいリスクの概念

リスク心理学という分野が社会心理学の中にあるが、Slovic はその第一人者である。その彼が、「リスクというのは客観的なものではない。社会が組み立てたものであって、客観的に存在するものではない。」と言っている。つまり、リスクというのは語源の *To navigate among cliffs* のように、何か私たちが行動を起こす時に、何も起きないとよいが、そうではなくて目的を達せられずに何か起きてしまう一抹の不安を想定している。社会は常に何か望ましくない事態の発生を想定している。実際に事故が起きればそれは事実となるが、その前の段階で私たちがリスクというものを想定している時は、明らかに客観的に実在しているのではなく、心理学的にリスクを私たちが心の中に描き、備えているのだという考えである。

## 6. 宇宙におけるリスクを考える

この委員会で問題にしている宇宙のリスクの捉え方を原子力発電の場合と比べてみよう。

原子力発電のリスクというのは、工学リスクとして、原子力発電所で事故がどの程度起きるか、Melt Down のようなシビアな事故がどの程度起きるのか、その事故が起きたときに周辺住民がどのくらい被ばくをして、健康障害をもたらすのかを、先ほどのリスクカーブで捉えるわけだが、宇宙の場合はこれとは明らかに違う。チャレンジャー事故のようなものは被ばくとは全く独立のものである。宇宙へ飛ぶことでトラブルが起きて事故につながるというリスクと宇宙船に乗っていることによって宇宙線に被ばくして健康障害をもたらされるというリスクとはそれぞれ独立であるから、リスクとして和で考えることになる。原子力の問題は常に積の形であるために複雑であるが、これに比べると宇宙の場合は比較的シンプルに考えられるのではないか。

さらに宇宙被ばくの特異性が考えられる。対象者はボランティアで、宇宙のミッションに目的があって参加するのであるから、医療被ばくに近いわけである。しかし原子力発電所の場合にはそうではない。リスクコミュニケーションの相手は原子力発電の場合は不特定多数の一般公衆であるのに対し、宇宙線被ばくによる健康リスクを問題にする場合には搭乗者に限定ができる。少なくとも我々が生きている時代では搭乗者は限定されるであろうから、一般公衆とは違う特徴がある。そう考えてみると、今宇宙の放射線防護を考える時に、従来の放射線防護の考え方を当てはめようという動きがあるが、それで果して良いのかという疑問がある。例えば一つの例として、被ばくの限度がある。一般公衆を意識し、確定的影響、がんや遺伝的影響に注目し、低線量であればがんや遺伝的影響をできるだけ少なくし、社会的にアクセプトできるレベルにもっていこうという目標で限度を考えているわけだが、果たしてこういう考え方が宇宙

線の場合にも適切なのだろうか。NASA のシンポジウムの記録として **Radiation Research Supplement 156,460,2001** に過去の宇宙船搭乗者約 500 人 フォローアップした白内障の疫学データが出ている。初めてのデータだということだが、8mSv 以下の低線量のグループと 8mSv 以上のグループで分けて、**High Dose** グループ、たしか、平均が 40~50mSv だったと思うが、そのグループは低線量グループの人々と比べて、白内障が多いというデータである。白内障は今の知見では、いわゆる医療でエックス線被ばくをした人たちのデータからしきい値というのが 2 グレイという高いところに決められているが、それよりもかなり低いところで、宇宙航空士に白内障が出ているという疫学データである。こういうデータは非常に大事なのではないか。NASA により調査されたデータであり、宇宙放射線防護をどう考えていくべきかの上で大切なデータになると思う。一方で癌を考えた場合に、500 人くらい宇宙航空士の疫学データを調べることによって癌の増加が検出されることは現状の知見ではまず考えられないので、広島長崎のような Low LET を中心とした疫学データをベースに RBE はいくらかを考えるなどのアプローチしかないだろう。しかし白内障に関しては疫学データが出ているので、これをベースに健康リスクというものを考えていくことになるだろうと思う。白内障というのは従来確定的影響、しきい値のある影響と考えられて、現在は被ばくの限度というのは確定的影響よりも、確率的影響の方が限度としては低い限度を導き出すために、確率的影響によって限度を決めようという考え方があるが、このデータから考えるとむしろ白内障の問題に着目すべきかもしれない。もちろんこの辺はいろいろ議論がある。

## 7. リスク心理学にリスク制御を学ぶ時代

リスクキャラクターゼーションの問題とリスク評価の問題に戻るが、二つの課題の一方のリスクキャラクターゼーション、社会とまたは宇宙航空士の人たちと対話をしていく問題を考えた時に、リスクの説明が専門家の中でもバラバラであるという問題がある。数グレイまでも影響が出ないという人もいる一方で、広島、長崎のデータをみるとしきい値の存在を考えるのは難しいと見る人もいて、社会からみれば専門家といわれる人が非常に両極端な言い方をしているように映る。このような現状にあって、影響評価の推定の不確かさだけが強調されてしまう風潮もある。不確かさの原因の解明が科学の仕事だから、そこを強調するのは科学の場においては必要でも、社会との対話において不確かさだけを強調することはリスクの正体を必ずしも伝えることにはならない。リスクの説明に不確かさだけを強調するのは混乱だけで解決はない。我々が学ばなければいけないのは Slovic のようなリスク心理学者が言っているリスクの捉え方ではないか。我々はリスクというと頻度論的なものとして捉えてしまう。確率という手法を持ち込んでいろいろな仮定を使って計算し、事前に評価される確率があるレベルを超えないようにしようという筋道をいつも考えてきた。しかし、リスク制御という視点からリスク心理学のようなもっと別のアプローチを学ぶ時代ではないかと思っている。そういう意味でリスク心理学のような社会科学系と自然科学系の専門家同士が対話をして、今後宇宙線に限らず、原子力も含めた放射線被ばく、特に低線量のリスク制御をどう考えていくのかということサイエンスと別のところで進めていかなければリスク問題の解決はないように思う。

## 【質疑応答】

Q：歴史的なリスクの概念で安泰志向と安全志向の違いを再度説明していただけないか。

A：危険をはらむものが何もない状態を志向するのが、安泰志向。船に乗って旅をする場合、旅すること自体座礁、沈没などトラブルが起こりうる、しかし目的がある以上、トラブルは裏腹で、無事な航海となるように志向しているのが安全志向、という違いである。

Q：少し分かったような気がするが。

A：人間の行為に伴うものがリスクであり、自然災害というのは歴史的にはリスクとは言わない。リスクという語が様々なところで使われるようになり、言葉が氾濫している。専門家でさえ、リスク学会のリスク研究者でさえ、リスクに対するイメージが様々だ。そういう現状でリスクというものを社会にきちんと説明できるかという疑問があるが、そこを越えていかないと、結局は社会との対話に失敗してしまう。自分たちは放射線のことにはよくわかるが、専門外のこと、たとえば自分の家の近くで新しく建つ清掃工場の説明会があり、そこで危惧されるダイオキシンのリスクを説明された時、自分はどのような情報がほしいのかと考え、それと同じ立場の人に対し放射線をどう伝えていけばいいのかという見方をすれば社会との対話の際に何を注意すればいいのかわかるのではないかと思う。放射線の影響について、専門家や関係者の説明が十人十色であるために社会に伝わりにくいのではないか。

Q：そうすると新聞誌上によくある放射線の

リスクという言い方は本来ないわけで、放射線そのものは Danger であって、放射線をさわるとか飲むとかいうことをすればリスクになるという、人為的なものが入らないとリスクでないということか。

A：そうである。我々が原子力や放射線を使う、宇宙に飛び出す、そういう行為の結果としておこるもの。

Q：リスクという言葉が一人歩きをしていて、リスクファクターの様な話になると、今の先生のお話では説明できなくなるのではないか。

A：そうである。最近放射線ではリスクファクターというのはあまり使わず、生涯がん死亡確率という言葉を使うようになっていいる。化学物質の分野ではリスクファクターに相当するユニットリスクという言葉を使うように、分野が少しかわるとリスクという言葉も様々に使われてしまう。確かに便利ではあるが、危険とどこが違うのか、概念が不明確になっている。

Q：社会との対話においていわゆる周辺で見ている人、直接関係のない人の精神的不安というものはリスクと関係しているのか、それを無視してしまうとリスクは勝手な概念といわれてしまうし、精神的社会的不安にきちんと答えて、なおかつできればそういうものに左右されない絶対的なものがないと、せつかく安全対策をとっても社会との対話の中で対策のメリットは小さく、細かい部分が不完全であるように思われるが、その辺の関係をどう考えられるのか。

A：誤解されるのは、安全を強調するために

リスクというものを便宜的に使っているのではないかという見方をされがちだが、そうではない。船旅に出る場合は、無事につきたい、目的に達したい、そのためにいろいろと想定する。もちろんそのシナリオは不完全であることも考えなければならない。そういうことを考えること自体がリスクを考えることで、それが我々抜けているのではないか。とくに低線量の問題は、低線量は不確定だとして、いろんな不安が巻き起こる。低線量で被ばくした時に何が起きるのかという問いに対し、10mSv だと、今の疫学データからすると何千人中何人が 30 年以内に癌で死亡しますというのが、良い正しい答えでないことについては皆さん納得できると思う。もしそういう形でしか、リスクを説明しないとしたら、大きな問題である。ではどう説明するかというと、これがリスクキャラクターゼーションであるが、私の思うリスクキャラクターゼーションは事実を伝えることである。事実といっても矛盾する事実が沢山ある。たとえば生物学的なデータでは低線量で adaptive response が起きるが、それは疫学データでは見えないというのも一つの事実である。だからといって低線量が、active に反応してしきい値が起きるかどうか誰もまだわからないし、そこまで解釈できない。しかし、少なくとも事実を伝えることと、放射線を使う、または放射線を被ばくするような宇宙に飛び出すためにナビゲートする時に、現状でどういう事実に基づいて、低線量で被ばくすることでどういうことを想定しているのか、どんな事実を基に、安全を求めようとしているのかという説明が必要だと思う。ある対策をしている根拠と事実とのつながりについてきちんと説明をせず、ただ基準を示すだけでは理解されない。矛盾している事

実も伝えなければならない。その辺がリスクキャラクターゼーションの目指すところではないかと思う。

C：リスクというのは避けるべき対象に投資する価値で測られるのでは思う。ある種危ないものに挑戦していくという状況でもエネルギーを投資する価値のあるもの、そういうところで測れるのではないか。宇宙に行く場合でもいわゆる人類の生存の機会というものに対して投資して、かけるべき課題が出てくる。それを定量化するところから、リスクを考えるのを出発した方がいいと思う。

C：リスクというのは社会的にどれだけ許容されるのか、ここまで許容しようというのを、行政が決めるのか、科学者がきめるのか、あるいは国民が決めるのか、それによりリスクというのは変わってきたように思う。それ故宇宙飛行士に対する場合はどうやって決めたらよいか問題になる。

A：現状で行われている防護は、確率という概念で捉えて、影響の起こる発生確率を一所懸命評価するというものだ。動物のデータしかなければ、それを人に持っていくときに、様々な不確定要素が入ってしまうが、確率をともかく出してしまおう。そして社会の事故や疾病などの統計データと比べようとする。同じ確率だからということで土俵にのってしまうが、その背景を見ると、果たしてその数値が本当に comparable なのかは議論がある。ただ、今は放射線もそうだが、年あたり 10 のマイナス 3 乗の死亡率というのが一つの目安になって放射線の限度を決めているが、そういうアプローチで社会にリスクを理解してもらうのは、難

しいのではないかと思う。千人に一人を認めるということがどうしてアクセプトできるのかという議論になり、絶対に答えが出ないと思う。それはリスクの一面を語っているだけで、トータルなリスクをみていないように思う。基準を決めるときは確かにそういうアプローチも仕方がないが、社会と対話する時には、それだけでは、問題がある。トータルなリスクを話した上で、そういうものを含めるのはいいと思う。そうするとトータルリスクをどう話すかが一番問題だが、もしそれを行わないと、対話の中で満足しない。満足しないということは不安につながる。不安につながることは様々な意味でマイナスになってしまうことが多い。

Q：今日の話の中で工学的なリスクと、個人に関わる健康リスク、そしてもう一つ社会的リスクというものが今の議論であった。リスクはどうも相対的なもので決まっていると、リスクをつきつめると非常に難しいが、日常で身近なのは保険ではないか。生命保険や対物損害保険に入り、リスクの中身や確率はわからないまでもお金の額として、そういうわりきり方で理解している。危機管理の危機というのは何だろうか、あるいは突然起こった事故の損害賠償額が生命保険よりも高いのはなぜか、というように、最も身近なリスクの議論は保険である。リスクをまるめて、総体としてみる一つのやり方が保険で、それは皆さんもだいたい感じはわかる。そういう理論とこうした理論がどういう関係にあるのか示すべきではないか。

A：今日は紹介しなかったが、リスクの考え方はもともとは保険である。船旅にあたっ

て保険に入るというところから歴史的にはリスクという概念が生まれている。

Q：それをつきつめると、宇宙飛行士の損害保険はどこかが請け負ってくれるのだろうかと思う。原子力損害賠償法のように、宇宙におけるエンタープライズのリスクの保険を請け負うケースがあるのか、ということにも関係する。宇宙飛行士は確かにボランティアだが、エンタープライズとしては補償しなくてはならない可能性がある。そういう恒常的な問題を含んでいる。

Q：原子力分野でのリスクに対して保証の考えがあり、つきつめると安全にかけるのか、事故の後始末の方にかけるのかという判断がある。安全対策費、あるいは補償費はリスクの中に入っているのか。

A：事故のようなものは別だろうが、低線量は議論に入っていないのではないか。低線量のリスクをどう認識してどこまで投資をしてセイフガードを確立するのかということは考えるでしょうが、それ以上のところではないのではないのか。

Q：具体的には放射線安全に対する不安がはっきりすれば政府がリスクを保証しますというような議論がいろんなところではできるはずだ。

A：そうした議論は政策論ではやるべきだろうが、現状は難しくできていない。

Q：宇宙の件でお考えをうかがいたい。火星ミッションでは何らかの健康影響が出るのは避けられないと思うが、宇宙飛行士は火星に行きたいわけだから、健康への影響についてきちんと説明して、本人がそれを受

容して行くと言えればそれでよいと思われるか。

A：純粹にボランティアと考えるならそうだと思う。

Q：リスクコミュニケーションを行って、本人がそのリスクを受容した上でミッションに参加するのであれば、問題はないということか。

A：宇宙探査と原子力産業とは違うので、それは可能と思うが。

C：個人ベースで考えるなら雪山へ行く人のことを考えてみればよい。しかし、国がプロジェクトに大きなお金を出しているという背景があるから難しくなる。国が何かしなければいけないとなるとそういう議論になる。

C：山で遭難しても、国は救難活動をしないではいけない。宇宙飛行士はただのボランティアではないと思う。どうなってもいい、どんな疾病が出てもいいというわけにはいかないと思う。

C：宇宙飛行士にはどんなリスクがあるのか何回も申し上げて納得していただいている。

Q：シナリオは不安定で想定外というのをどうとらえるのか。

A：ニューヨークの同時多発テロ事件は想定外であったが、では今後は常にあの様なことを想定してビルをつくるのかということ恐らくそれは難しいだろう。ヘリコプターの落下は想定しているであろうか。

Q：もしもあれが原子力発電所であったらと考えると。

A：それは大変大事な問題だと思う。

Q：ある程度想定できても、必ず想定できないものもあるということか。

A：全く想定できないものが必ずある、ということを教訓として考えなければならぬということである。それをどの程度の重みで考えるかというのが難しい。

Q：宇宙とは関係ないが、先ほど中性子モニターの話があったが、テロの事件以降、地方自治体は、放射線モニターをもって時々変な物が放置されていないか、測ってみるべきだと考えている。そういう体制がないとより幅広く放射線を利用する時代は迎えられないと思う。

A：今それに関連してスクラップの中に放射性物質が紛れ込んでしまう、ということが大きな問題でこれから益々増えると思う。その問題にどう対応していくのかというのも社会にとっては大事な問題である。

# 「産業技術総合研究所における宇宙放射線関連研究」

瓜谷 章（産業技術総合研究所）

## 【講演内容】

今回は、独立行政法人産業技術総合研究所とその研究について紹介したいと思います。

### 1.組織

産総研は、以前の工業技術院傘下の電総研、機械研などの研究所、地方の名工研などを一つの組織に組織替えしたものである。ただし、工業技術院を単に名称変更したのではなく、改組された後の産総研では人事、財務などを統合し、その下に研究郡を設けている。研究郡では今までの研究所の枠をとりはらい、かなり小さい研究郡をつくった。壁をとりはらって人事交流をおこない研究が進みやすい組織にした。

独立行政法人といっても独立採算をめざしているのではなく、運用や人事の制限をとり、自由にやって成果を出すことを目指し、そのかわり評価部がしっかり評価をする。四、五年の中期計画に基づいて中間、最終審査を行い、存続を決定する。個人についても毎年評価され、業績手当が 50-200%の幅が出ることになっている。

国立研究所から独立法人化することで、印象として強いのは安全管理面が重要になったということだ。大学、国立研究所は労働安全衛生法の適用を除外されていたが、独法化により適用を受けることになり、安全管理が厳しくなった。放射線計測に使うガスも 10 気圧以上は室内に持ち込めないなど制限がある。

私の所属は計測標準研究部門である。これ

は従来の計量研、電総研、物工研を一つにまとめたもので、その中の量子放射科に所属している。量子放射科には、放射線標準研究室、可視光関係の光放射標準研究室、放射能中性子標準研究室がある。中性子関係は昨今の社会的情勢により注目されている。現在、線源からの放出率、熱中性子フルエンス、中高速中性子のフルエンスを供給している。

こちらの図は私共の中性子発生施設である。10数メートル立方の部屋の中間にターゲットを設置できるようになっていて、中性子の散乱寄与をできるだけ低くしようとしている。二つのビームラインがある。（了承いただければ図を掲載）

### 2.宇宙線関連研究

産総研における宇宙関連研究は、この委員会で対象にしているような宇宙放射線関連の研究は多くないが、若干対象範囲を広げて、文献なども探してみた。その中で、興味をもっていただけそうなものを紹介したいと思います。

#### (1)中性子計測

中性子計測に関してはこの委員会に密接な関係があると思う。産総研として関わっているものを共同研究も含めて紹介すると、一つは早稲田大学のグループが進めているセンチファイバースタックを使った中性子測定がある。これは中性子数と LET を測定するようになっている。

次に紹介するのは、単一減速球型中性子モニタで、私が名古屋大学時代から研究しているものである。今のところ実現していないが

宇宙の打ち上げに有利な点があるということ  
で、開発してきた。一点この検出器には問題  
点があり、構造上指向性を持っている。ある  
一方向からの中性子の入射を想定して作った  
検出器の応答関数を用いて、その最初に想定  
した角度からずらした角度で中性子を入射し  
た時にその推定スペクトルがどう変わってい  
くかということなのだが、 $30^\circ$  くらいまでは  
良いが、 $40^\circ$  を超すと得られるエネルギー  
スペクトルがずれてくるという問題がある。む  
しろ検出器の異方性を利用して、逆に中性子  
の入射方向を出そうと研究している。様々な  
方向から中性子の入射に対しそれぞれに応答  
関数をつくり、60 点のニューラルネットワ  
ークを作って学習させ、未知の方向から入る  
中性子を入れると、方向ベクトルを出すとい  
うものである。ただし、一方向入射にしか対  
応できない。エネルギーの低い方では若干  
悪い結果も出るが、ある程度のエネルギー  
では精度が良い。まず、入射方向を推定し  
て、その後エネルギースペクトルを推定す  
るということをすれば、ある程度は異方性  
のある中性子までも対応できると思う。し  
かし、多方向から入ってきている場合への  
対応は、まだ検討途上である。

## (2)逆コンプトン散乱高エネルギー光子を用いた研究について

800 MeV の蓄積リングがあり、これにミ  
ラーを介して YLF レーザを入れると、逆  
コンプトン散乱が生じる。コンプトン散  
乱は電子に  $\gamma$  線があたる現象であるが、  
これは光子に電子があたってエネルギーを  
付与するイメージである。これを利用し  
た宇宙関係の研究は、一つは甲南大学  
の宇都宮先生のおこなわれる超新星爆  
発における重元素生成 (R-process) に  
関する研究であり、他には高エネルギー  
光子を用いた CT というのを産総研の  
豊川氏が行っているが、指向性が高く  
エネルギーの高

い中性子を使うので航空機やロケット  
など大型の工業生産物の非破壊検査に  
適用することができる。普通の X 線  
では通らないようなものでも高いエ  
ネルギーの  $\gamma$  線を使うと内部の構造  
がよく見える。

## (3)超伝導 X 線検出器

産総研の大久保氏が中心になって天  
体観測用の超伝導検出器の開発も行っ  
ている。エネルギー分解能が 100 分  
の 1 程度に改善できるだろうとい  
われている。

## (4)半導体放射線損傷に関するもの

半導体放射線損傷に関するものが  
何件かある。半導体が放射線によ  
って、よくいわれているように、  
ソフトエラー、ハードエラーを起  
こすことについての研究である。ま  
た、最近耐放射線性が高いという  
ことで原子力の分野でも注目され  
ている、SiC 半導体および SiC  
半導体検出器なども研究されてい  
る。他には太陽電池の陽子照射  
による劣化などの研究も過去にな  
されている。

## (5)その他

変わったところでご紹介しておくと、  
「宇宙ステーションに搭載する電子  
ライナックの試運転とその電子ビ  
ームを使用しての火山の噴火に伴  
う雲の放射線処理」というものが  
ある。処理対象の雲中物質は、  
 $\text{SO}_2$  と OCS (硫化カルボニル) で、  
実現は難しいと思うが、原研の  
高崎では排煙処理に実用化されて  
いて、それを地球規模でやろう  
というアイデアである。

他に「粒子加速器による宇宙実  
験」のように宇宙での宇宙船の  
帯電をとるためにビームを用いた  
という研究も過去になされている。

他に宇宙放射線とは直接関係は  
ないが、宇宙用の小型マニピュ  
レータシステムや宇宙飛行ロボ  
ットの研究、精密テレロボティク  
スの

研究なども行われている。

### 【質疑応答】

Q：電子ライナックで火山噴火の雲を処理する場合、高度は宇宙ステーションで適当なのか。

A：解らないが、こういった利用の提案もあるというということだ。

Q：先ほどニューラルネットワークの話があったが。

A：今の場合は方向ベクトルを決めるのに使っている。現在は、入射中性子の方向を一方向に対し決めるだけで、本当はそれではいけないので、改良しようとしている。

Q：たとえば、複数の検出器を使って方向を決めるのも可能なのではないか。

A：それは可能である。

Q：シンチレーションファイバー型の中性子検出器のお話があったが、どのように進めているのか。

A：共同研究ということで、早稲田大学の道家先生のところの人がきてやっている。中性子発生設備というのは外部にも開かれており、共同研究の他、一部有料になるかもしれないが外部の方の利用も可能である。中性子は重要だといわれているが、利用度は高くないので、是非、使っていただきたい。

Q：中性子照射の精度は。

A：放射性同位体の放出率でいうとは1%。高速中性子の方は状況によるが、ほぼ5%程度である。

A：高エネルギー光子の発生場も公開しているので、宇宙関係で使うテーマを出していただければ共同利用が可能である。

Q：その場で、 $\gamma$ 線強度の低い方はどのくらいまで下げられるのか。

A：レーザーのパワーで調節するので、上の方は  $10^4/\text{mm}^2$  ほどまでだが、下はいくらでも下げられる。

Q：生物試料を照射した経験はあるか。

A：知る限りたぶんないと思うが、可能である。

Q：たとえば実験中に $\gamma$ 線のエネルギーを変えながら照射することは可能か。

A：電子のエネルギーを変えることによって可能である。また実験中も近くに人が入れ試料交換など簡単にできるので、使い勝手は良いと思う。

Q：産総研で他に放射線施設はあるのか。

A：放射線関係は旧物質工学研究所でコバルト60の照射施設があるが、物性関係だと思う。今日ご紹介したものの殆どが旧電総研関係のものである。

Q：中性子の線量標準はしているのか。

A：線量標準まではしていない。

## 「細胞増殖への影響」

江口一笠井清美（放射線医学総合研究所）

### 【講演内容】

細胞周期は DNA 障害の生成により停止すると考えられており、培養細胞では G2 期における停止の長さや致死効果との間に相関関係があるとの説がある。一方高 LET 放射線では細胞致死効果および G2 停止効果がともに大きいことが知られている。伝統的放射線生物学研究は主に齧歯類の培養細胞を用いて行われてきたが、これらの細胞では細胞周期調節に重要な役割を持つ p53 に変異のあるものが殆どであり、G1 ブロックの認められないものが多い。それに対してヒト正常細胞では、G1 期に長期に渡り滞在している細胞が殆どであり、放射線照射後にも G1 期停止の効果が大きくなる可能性がある。そこで、重粒子線の G1 および G2 停止効果とそのエネルギースペクトラムをヒト正常細胞を用いて調べ、チャイニーズハムスター細胞の場合と比較した。

ヒト正常繊維芽細胞由来培養細胞 (NB1RGB) に X 線、C 線 (細胞位置での LET 77~250keV/ $\mu$ m)、Si 線 (LET 245keV/ $\mu$ m) 照射後の細胞動態を調べたところ、チャイニーズハムスター (V79) 細胞と同様に、線量に依存した G2 停止が観察された。ピークに達するのは照射後約 10 時間であり、V79 よりも長時間を要した。同調の程度については、照射後 10 数時間まで V79 程の顕著な停止は認められず、最高で Si 線 2 Gy 照射時の 50% であった。これは細胞倍加時間が V79 より長いこと、および V79 には見られない G1 停止の存在に起因すると考えられる。これは

NB1RGB の p53 遺伝子 (G1 停止に重要である) が正常であるのに対して、V79 細胞では突然変異があることと対応する。NB1RGB は C 線および Si 線照射 2~5 時間後から G1 期から S 期への流入減少が認められたことから、G1 停止が存在すると考えられた。G1 停止にも LET 依存性が認められた。NB1RGB 細胞では 77keV/ $\mu$ mC 線照射でも G2 停止からの回復が遅く、ピークの半値幅は計算できなかった。被照射細胞は対照群よりもゆっくりとではあるが増殖するが、細胞は膨潤化し、対照群より低密度で増殖を停止した。照射 10 時間後 BrdU 取り込み細胞が G1 期に観察されることから、G1 期まで達した後に増殖を停止する細胞群が存在すると考えられた。逆に G1 期、G2 期から動かない細胞群も観察された。C 線および Si イオン線照射により、約 6 時間後に CyclinB1 の発現が認められた。

### 【質疑応答】

Q : 人の細胞の場合 G1 期に止まっているということは、淘汰の課程でおこったということか。つまり止まる理由だが、何らかのメカニズムでそれが Dominant になっているわけで、細胞にとって好ましくない状況で一種の防御が図られるということか。

A : 細胞としては放射線があたった場合、Dominant の反応は死んでしまうこと。照射後細胞周期が止まった細胞も見かけ上は一

週間くらい生きていますが、分裂は完全に停止してしまい、蛋白の合成もだんだん落ちてきて、実際は死に向かっている。ここで照射した線量 1-2Gy では約 80%以上の細胞が死んでしまう線量であり、死んだことによつて G1 期にそのまま止まっているということだと思ふ。もともと人の正常細胞は G1 期で止まりやすい性質をもっている。放射線をあてなくても、培養細胞は G1 で止まった Population と分裂を続ける Population に分裂ごとにわかれていくイメージである。

Q : がんなどではいろいろな反応があつて、ネットワークで捉えなくてはならない。今の場合でも、止まるものと止まらないもののコンビネーションとして、全体として生きていくと想像される。それが一つのシステムとしてうまくできている。ネットワークとして判断するにあつてこのような細かい研究は役に立つと思ふ。

A : 止まった方が、発ガンの危険はない。傷があるうちに DNA 合成や分裂を開始してしまうと、間違つた DNA 合成や分配をする可能性が増える。そういうことを避けるために、それぞれのドラスティックな反応を起こす前の休止期の段階で止まって、リペアをする。リペアがうまくいけば先に進み、うまく行かなければそこで止まって死んでしまう。細胞にとっては合目的である。ただし、がん細胞と正常細胞ではかなり違ふ。重粒子の場合は、細胞からみるとシビアな状況で、そういうことは関係なく止まってしまふ、死んでしまふという方向にいく細胞が多い。

Q : 重粒子線はすべてそうか。

A : エネルギーの低い粒子線、重い粒子線ほどそうである。

C : エネルギーの低いという表現は誤解されるので、LET が高いものは細胞周期を止める、そして細胞が回復しない傾向にいくべき。背景を説明すると、実際に重粒子線があてられて、細胞周期が G1 で止まってしまつて戻つてこないものは、細胞が傷害を受けて治しきれずにそのまま止まっている、あるいは放つておけば死んでしまふ。以前私も HIMAC で重粒子線を照射して、細胞の傷害を(顕微鏡で)観察したことがある。エックス線の場合だと均一に細胞が傷害を受けて均一に治るが、重粒子線では傷害のばらつきが非常に大きく、また治らない Fraction がどうしても出た。鉄などでもほとんどほぼ治らない細胞ばかりになってしまうといわれている。ということで、データは良くわかつたのですが、細胞の顔やリペア、Apoptosis はどうなつているか、という話があればもっとよかつた。

Q : その場合重粒子は全部の細胞に確実にあつているのか。

C : 数学的に見て、全部の細胞のどこかにあつている。しかし、DNA を突き抜けたのは、0 か一個か二個かになると思ふ。ここで使つた  $200\text{keV}/\mu\text{m}$  の鉄だと少ない。 $400\text{keV}/\mu\text{m}$  の鉄を 1Gy、CR39 に照射してトラックを見ると、あきらかに  $30\mu\text{m}$  離れている。本当に傷害が出るのは、DNA だと仮定すれば、DNA しか用がない。細胞質を突き抜けるものはほとんど影響がないが、細胞周期を止めるような作用は、DNA 切断したもの、あるいは重傷を負つた DNA だとすれば、その近くの面積だけを統計的にカウ

ントすると、非常にポアソンのになる。

Q：それは粒子の種類は関係あるのか。

C：大きくなれば影響面も大きい。鉄のような重粒子はいったんぶつかると細胞の半分まで影響が及ぶ。

Q：重粒子だと、実際の宇宙ではどのくらい怖いのか。

C：これは細胞一個の話であるから、人間とは比較にならないと思う。

C：人間を考えると計算はなかなか難しい。

Q：その場合さきほどのバイスタンダー効果はどうなるか。

A：バイスタンダー効果が現れるのはもう少し線量が小さい。ここで照射した 0.5Gy では平均的に1細胞に一個あたっているので、バイスタンダー効果が出てくる部分もあるとは思いますが、見えない。

Q：High LET の場合、生存率曲線は直線か。

A：High LET の場合、直線でないとすると、特殊なことを考えなければならなくなる。培養細胞では多少は4培体の混在やセルサイクルの違いなど、特別に感受性の異なる細胞が混じっている場合も、直線ではなく2相性に出ることがある。しかし5%以下の生存率では誤差が大きいので、議論する意味があるのか疑問である。

Q：6桁くらいはかっている人もいるが。

A：小腸の細胞などでは理論的に可能だが、培養細胞だと無理。というのは単位面積あたり100個播くのと、10万個撒いて死骸が累々なのと同じ条件かということ、わからなくなる。実際問題死骸が多いと毒が出てくるので、コロニーがちゃんとしていないなど、いろいろな問題が出てくる。普通は培養細胞の場合は3桁がぎりぎりである。

Q：培養細胞と個体とで何か違いがあるか。

A：あると思う。それこそ、バイスタンダー効果では、細胞と細胞がくっついているところにギャップジャンクションができるので。そうなるとかなり違ってくる。培養細胞でも、これはセルサイクルを見たいために、回している細胞ですかすかの細胞を照射しているが、その時のサバイバルカーブと、ぎっしり撒いたときのサバイバルカーブは違うので。

C：バイスタンダー効果だが、極端な例だと、違った場所に照射しても、右手にがん作っておいて、左手が治る、というようなことが、理論的には可能だ。

A：組織の場合は、免疫系どうかなるなどほかの問題が出てくるので、随分細胞とは異なる。

Q：培養細胞を使った実験というのは有意義だと思うが。

A：完全にモデルケースである。逆に個体を使うと現象はわかるが、何をみているかわ

からない。また、人とネズミは随分違うという問題もある。ボランティアの宇宙飛行士で疫学研究すればデータとしては一番いいと思うが、モデル研究しようと思うと、何を狙ったモデルかで適したモデルがいろいろある。単純化したモデルとしては培養細胞はそれはそれでよいと。

Q：細胞でやるとメカニズムはよくわかる、個体でやるとメカニズムはあやふやだ。同時にできるような研究システム、グループ化はないか。細胞でやったことは個体をみるのにどれだけ役に立つのか、例えばがんになるのか、寿命は縮まるががんにはならない、とかそういうことを推定するためにどのくらい役立つのか、また、それを個体で検証するような実験システムというのはないか。いつも言うが細胞やる人は今一つ

動物がわからない、動物をする人は細胞のことはわかるが結果を反映しないでは、際限のない議論になる。

C：細胞レベルでは徹底してメカニズムを研究する、その結果を生体で反映できるような実験方法でやるのがよいのではないか。

C：なかなかそういう組み合わせは、情報をどうするかという問題がある。メカニズムの研究とそれが本当に役立つかということのギャップがある。放医研のいろいろな人のしていることが、一つにつながるような研究方法があるとよいと思うが。

A：確かにそろそろ共同でする方向を考える時かと思う。

## 「宇宙放射線生物影響研究の問題と課題」

長岡 俊治 (藤田保健衛生大学)

### 【講演内容】

今までの経験に基づいて宇宙放射線生物影響研究の問題を話す。まず STS91 という、国際宇宙ステーションとほぼ同じ軌道を飛行したミッションで、RRMD-III という検出器で宇宙放射線を計測した結果について説明する。その軌道は重粒子線の目立つ環境である。

RRMD-III を使えば分単位の時間分解能で測れる。この検出器で、過去何回かリアルタイムで宇宙放射線環境を測った。地上と違い、重粒子線を含む色々な線種の放射線が船内に入ってくる。線量率は  $\mu\text{Gy}/\text{min}$  のオーダーにあり、一日で平均すると、大体  $\sim 10 \mu\text{Gy}/\text{min}$  だった。STS89 (NASDA が船内の中性を最初に測った時) のミッションでは、飛行中のイベントを Gy に直さずイベントカウントのまま表した。赤いところが  $1500\text{Count}/\text{min}$  である。この時はボナボールという方法で計測したので、1-2MeV 位までの中速中性子までが対象であったが、南大西洋上空を通過する時、確かに船内に中性子が増えている。あと極地域を飛ぶ時に重粒子線が入ってくるのが分かる。重粒子が蹴飛ばして作ったと思われる中性子が検出されているのが特徴。これは RRMD-III のリアルタイム計測で得た LET 分布で、ある数分間の領域の LET プロファイルを、 $0.1 \sim 1000\text{keV}/\mu\text{m-water}$  までの範囲で示す。ギザギザしているのは色々な線種のもので飛

びこんだためと思われる。宇宙環境には、中性子や重粒子、またそれらから作られる色々な線種の放射線が存在することが分かる。

非常に粗く生物影響を論じる場合は、そんなに厳密に考えなくてもよい。宇宙線は、軽粒子としてはプロトンとアルファを含めてほしい存在比が 99%、重粒子は残り 1% である。その中で比較的鉄が多くて、全体の 0.01% くらいある。生物影響を考える場合、チャージの 2 乗が LET に相関しているのので、線質係数のカーブを考えると、重粒子線全体をあわせた生物影響は大きいかもしれない。したがって、フルエンスでは 0.01% の鉄も、生物影響への相対寄与としては、陽子と Equivalent に近いと言われている。

放射線生物影響研究の領域について現状を整理すると、まず、低 LET 放射線と高 LET 放射線の影響研究とに分けられ、更に線量レベルによって高線量域と低線量域に分けられる。実験方法で分類するなら、地上でよくやられるように、高線量率照射と低線量率照射の影響研究ということになる。放射線の生物影響自体については非常に多くのデータがあるが、現在行われている放射線生物影響の研究は、大半が高線量率・高線量域で行われている。高 LET 荷電粒子の場合は、HIMAC で得られるような高エネルギー重粒子線を用いて行われるが、放射線治

療で使うレベルの高線量率での影響を見る研究が多く、低線量率で高線量になるまで当て続けることはほとんどない。

一方、非常に低線量・低線量率の領域でどんな生物影響の現象があるかを調べる研究はどうかというと、自然放射線研究の領域で、バックグラウンド放射線の疫学研究とかホルミシスの研究といったものがある。しかし、この領域では、他の環境因子の修飾に関する研究や高エネルギー粒子の研究はほとんどなく、したがって、宇宙放射線影響に関しては、環境因子、例えば無重力との相関等が未だに不明である。よって、この領域が、宇宙放射線の生物影響の研究として重要な課題ではないかと考える。ただし、実験手法を考えると、大変難しい領域である。重粒子線を低線量率で長期間当てることは地上ではほぼ不可能に近く、なかなか進んでいないのが現状。そこに宇宙のデータが出つつあり、それを検証するための研究を地上で行う必要があると考えている。

このような物理的側面と生物影響の接点で、私たちは何を考えたらいいか。宇宙放射線の影響研究を考えると、どうしても物理的特性と生物的特性の両方を考えなければいけない。私が NASDA にいた頃、物理専門家として早大の道家先生に、できるだけ生物寄りの発想で考えて欲しいとお願いした。一方で、生物は生物で、専門の先生方をお願いしたのだが、どうしても最後に問題になるのは、物理的な定量値を生物に対してどのように適用するかということ。

そして、経験的に理解したことは、まず生物は物理的に言うと均一な物体ではない

こと。そして、次第に塊が小さくなるにつれて、影響は相対的には離散的になるのではないか、ということである。影響が離散的に及ぶのであれば、高 LET 放射線が組織を通過した場合やそこで止まった場合には、低 LET の放射線が通過した場合と比べて、影響を受ける周りの範囲が平面的にも深さ方向にも変わってくるだろう。たまたま非常に高い LET の粒子が核を直撃すると、この核内は多分グチャグチャになるだろう、ということは誰もが想像がつく。しかし、核と離れた所を高 LET 粒子が通過した場合は、その細胞には影響が出ずに、隣の細胞に現れる現象、いわゆるバイスタンダー効果が生じるかも知れない。ただし、その範囲は狭いだろうというのが離散的影響の概念である。したがって、LET に依存する影響範囲がミクロン単位から数十ミクロン単位にとどまらず、もっと広い範囲まで及ぶという、それをどう考えるというのが一つの問題である。さらに、線量当量をどう考えるかということも基本的問題となる。離散的な生物影響を考えると、塊が小さくなって組織・細胞レベルから分子レベルになるにつれ、線量当量の概念が多分破綻してしまう。放射線が物質に均等に吸収されれば平均化できるが、そうでない場合は平均化できないからである。

トラック構造が LET に依存し、核種に依存するという例を示す。一つのモデルとしてこんな風に考えてはいかがかと言うものだが、まだちゃんとした解析ではなくて概念的なもの。たとえば I という細胞に J という粒子が当たった場合、その距離を考える。それから細胞の核の広がりも考える。例えば、オーダーとしては1-5ミクロン程度。平均的な細胞間距離というのは、細胞を撒

いた面積を細胞数で割って得られる核間距離だが、粒子が比較的均一に当たっている場合は、粒子の平均距離を考えればよい。ただし、飛んできた粒子 J から細胞 I が受ける影響は、周り全体で足してみなければならない。結局、細胞 I が感じる影響は、距離の関数になる確率  $p$  を掛け、そこでふりまかれる LET に依存する値を掛け、さらに核の面積に関係する値も掛けなければならない。ある影響範囲をデルタ関数的に捉えると、あるところまで行くと 1 になるが、そこを過ぎると 0 になる、という近似で考える必要があるだろう。例えば、粒子の平均距離が細胞間距離よりもずっと大きい場合は、当たった所から離れた所では影響はないが、当たった所でも比較的影響の確率は小さい。それがだんだんと縮まってくると、例えば粒子がヒットする確率は 1 に近くなる。第一次世界大戦下で、ドイツがロンドンを爆撃した時に、どこの地区に当てるか計算した式と同じである。当時のドイツが、まばらな離散的影響を確率  $p$  がポアソン分布するとして計算したのは有名な話である。

簡単なモデル的推定に実際の値を当てはめると、たとえば T25 のフラスコに  $10^8$  個程度細胞を播いた時、細胞間距離は 50 ミクロン位である。宇宙環境を考えると、重粒子線だとフラスコ内で一月に  $10^4$  くらいのイベントが起こることになるが、その平均分子間距離は 100 ミクロンくらいで、細胞よりも随分大きい。ところがプロトンやアルファは 4 桁違うから、一月に  $10^8$  個くらい入ってくる。その平均分子間距離を計算すると 1 ミクロン位で、細胞核の大きさに相当する。こういうことから、重粒子線を考えるなら離散モデルを使わなければいけないし、プ

ロトンやアルファなら均質モデルが十分使えるとかが得られる。

### 【質疑応答】

Q: 従来の軌道とは、スペースシャトルが飛ぶ高度 400 キロメートルくらいの軌道か。

A: その通り。その外では全然違う。

Q: 月と地球の中間ならば全く違うか。

A: 全く違う。火星に行く時は太陽活動の影響をそのまま受けることになる。オーダーとしては宇宙ステーションで一ヶ月滞在する場合の放射線の密度で、どういう生物影響が現れるかを調べようとしている。

Q: 例えば 30 日後に隣の細胞に起きたことを問題にするならば、こういう値になるが、それが問題になるのか。

A: だいたい細胞の実験をする時は一月を越えて培養することはない。せいぜい 1-2 週間。そこにずっと住むとか、1 年そこにいるようならば、もう少し密度も濃くなる。

Q: スペースシャトル内で減速するから LET も変わってくると思うが。

A: そこまで考えていない。生物影響を考える時は、少し丸め、粗く考えてみようとしている。物理計測としては重要でも、生物影響を考える場合には必要な精度が区切れるようになっているべき。

\*\*\*\*\*

ここから生物の側面に立って話す。放射

線を受ける生物側には、放射線がもたらす影響を排除する要因が沢山ある。一番問題になるのは、DNA が壊れた場合、それを治す DNA 修復機能。それから、生体ストレスに対する反応やしきみ、あるいは影響を受けて治らない細胞を排除する Apoptosis、免疫系機能、放射線が生成したラジカルの排除(SOD)、酸化還元系調節酵素群(TR)など。私が一番興味をもって取り組んで来たのは、ストレス応答、Apoptosis、修復機能などである。そのあたりについて話したい。

馴染みのない物理系の方のために、実験方法について説明する。生体組織は細胞が並んでいるものだが、影響を調べる時は、それを実験室で培養する。動物の組織からとった細胞をそのまま使うこともある。放射線がどの細胞に当たったかを物理的に同定することについては、必要であるが、今までなかなかできていない。局所的な影響を同定しようとする、そのままの状態を判定しなくてはならないということもある。

生きている組織のどの細胞、どこが壊れているかを調べるのが一つ。これができれば、ある程度物理的な計測にも役立つだろうが、うまく行く方法がなかなか無い。普通はもう少し細かい生物的影響を調べるために全部ばらしてしまい、DNA を染色して、アポトーシスを起こしたものを、死にかけたものの量をそれぞれ測る。あるいは、もっと細かく、そこからメッセンジャーDNA をとってきて、その特定の遺伝子が時間的どう変わったか、増えたか減ったかを見る、あるいは遺伝子の産物であるタンパク質の、放射線で変化したタンパク質を拾ってきてそのアミノ酸配列から遺伝子を定める。あるいは、単細胞の電気誘導で細胞中 DNA が

細胞レベルでどの程度変わっているか調べる。これをコメット法といい、このあたりになると、完全に分子、ナノバイオロジーの世界である。影響とは全く関係のない、全部が平均化された状態である。少なくとも、細胞レベルでどれくらいホモジニアスかインホモジニアスを調べる場合は、この程度の粗い実験による。

私が以前取り組んだことを概念的に述べると、以下ようになる。細胞が放射線を受けて問題になるのは核への影響だが、DNA が損傷を受けた場合、生物の機能としては、損傷を治そうという働きと排除しようという働きが必ずある。しかし、治そうとしても完全に修復できない場合もある。通常、低 LET 放射線ならば、高線量でなければ、修復は可能。紫外線損傷の修復もほぼ完璧にできる。重粒子線の場合には、多くの修復エラーが起きることが分かっている。また、低 LET 放射線でも集中的に当てれば修復エラーが起きる。この過程では色々なプロセスが生物の中で起きているが、それをどう解析するかが放射線生物影響研究である。そこで起きている現象をまとめると、細胞が放射線を受けて障害を受けると、死ぬか生きるかどちらかである。死ぬ場合は単純なネクロシス、つまり火傷などで細胞が死ぬのが主だが、これは低線量の放射線では通常起きないと思う。むしろ原発の事故のように、非常に高線量かつ高線量率でなければ起きない。普通は傷がついた細胞は治れば元の状態に戻るが、修復不可能なものの一部は Apoptosis によって選別され、組織として正常に戻る。そして、損傷が治りきれないで生きている細胞が、突然変異という形で影響を及ぼし、最終的にがん等になる場合がある。このプロセスが宇宙放

射線の生物影響を考える上で怖いところであり、いかに効率よくアポトーシスを起こして選択的な排除を行うかというプロセスが一つの課題である。

DNA 損傷について、どのようなパターンの損傷だとどの程度治る、といった情報は重要である。損傷の原因が直接的なのか二次的なのかは重要な問題で、直接ヒットした場合はともかく、それ以外の、例えばラジカルで DNA 鎖を切った場合、普通はほぼ完全に修復できる。鎖の一本が切れた場合、単鎖切断と言うが、これは比較的容易に修復できる。二重鎖切断では修復エラーが生じる可能性がある。さらに、重粒子等が直接ヒットしたような場合は、DNA 鎖が断片化する可能性があり、これは治るとは限らない。もう少し大きい塊として遺伝子を見た場合、一般には、部分的欠損又は染色体転座は完全に戻ると考えられる。

DNA あるいは遺伝子レベルで治りきらないものが突然変異を引き起こすと何が起こるか、何が怖いのかという問題がある。宇宙研究の領域で近年有名になったがん抑制遺伝子 p53 は地上でのがん診断や治療に役立っているが、この p53 遺伝子がおかしくなると非常に多くのがんが発生することが既に分かっている。この遺伝子の細胞レベルでのがん化を防ぐ働きが、地上の医学研究だけでなく、私どもが大西さんとやった宇宙実験でも確認されている。この遺伝子と関連した部分が突然変異するかどうかは、がんとの関係で非常に興味がある。これに限らず、非常に多くの種類の遺伝子について、がんとの関連の観点から研究することが、一つの方向でないかと思う。

Apoptosis とは何かと言うと、細胞レベルが障害を受けて、それを自己修復できない場合、個体を守るために、その細胞を選択的に排除してしまうことである。最近では Apoptosis とは自己修復能の限界から生体を保護するしくみ、と理解されている。私たちの姿形を変えたのも Apoptosis であるという説がある。私たちの身体も胎児の時には手に水かきがあるが、それが Apoptosis で取れて指になる。神経系も、要らない神経ネットワークが最初沢山できるが、使わない部分が徐々に Apoptosis を起こし、最適化されて行くことが分かってきた。Apoptosis は細胞の自殺として有名だが、別の言い方をすれば、生き残り戦略と言える。

ここで HIMAC を使って行った実験の一部を織り交ぜて紹介したい。ブリオプラストーマと呼ばれる、T-98G という神経系のガン細胞株をかなり高い線量で炭素イオン照射した後、特殊なタンネル染色という Apoptosis だけを染め分ける方法で染色する。緑色に染まったところが Apoptosis を起こしたところになるが、80Gy という非常な高線量を当てたにもかかわらず、Apoptosis は部分的に起きている。このように、生物系では、細胞全体にほぼ均一に高線量が当たっているにも関わらず、起きる現象は均一ではないことが特徴である。

それともう一つ、こういう実験も行うことができる。フラスコに付着した細胞に放射線を当てる。これをばらばらにして、アガロースという寒天みたいなものでサンドイッチにし、一部タンパク質を溶かして DNA を変性させ、両端にプラスとマイナスの電気をかけると、その中から壊れた DNA が帯のように出てくる。それを蛍光で染色する

と、DNA が壊れている細胞と壊れていない細胞の割合が、テールの長さを測ることによって分かる。これをコメット法と言う。これだと、少なくとも、細胞単位での影響がどのくらい均一かが分かる。

次に、エックス線と重粒子線の影響が細胞に対してどの程度違うか、あるいは均一か不均一かを示す実験例である。T-98G という細胞に、X 線を 40Gy 当てる。非常に強い線量だが、照射後約 30 分後、単細胞電気誘導の像を見ると、細胞の核が黄色く現れてくる。ここからプラス方向に DNA が出る。この長さは、何百個あってもほとんどの細胞が非常にシャープな統計値を示していて、ほぼ均一である。照射した細胞をそのまま培養し続けると、この長さがだんだんと短くなる。実は、これは細胞が DNA を修復しているからである。この短くなるなり方も均一である。いわゆる電磁波のタイプの放射線は全ての細胞に均一に当たるため、通常は比較的線量が少なくても完全な均一モデルを考えれば良い。一方、10 分の 1 の線量、4Gy のカーボンイオンを当てると（フルエンスを下げることでやや不均一な細胞照射をした場合）、当てて 30 分後には、全く当たっていない細胞と、影響を受けた細胞、その中間などで色々差が出る。しばらくするとテールがやはり短くなるが（この短くなり方は X 線とは少し違って比較的早く治ってしまうものもある）、最後まで治りきらないのが特徴。

先ほどのコメット法により DNA の流れ出した長さを横軸にとる。これはインデックス化して 1～6 段階に分ける。縦軸はインデックスに該当する細胞数である。天然の細胞でも若干テールが出るものもあるが、ほ

ぼ 80-90% は、細胞が流れ出ないインデックス 1 という状況にある。40Gy ぐらい当てると 30 分後に非常に大きなテールを示す部分が出る。この場合は X 線だが、分布は小さくて、全ての細胞がテーリングする。これが 2 時間もすると、明らかに細胞の中で DNA 修復が進んでくる。若干テーリングは見られるが、一日も経つとほとんど戻ってしまう。ところが、別の細胞として WI 38 を取り、炭素イオンを 4Gy と 8Gy を当てて 10 分経ったものを見てみると、未照射の細胞もかなり影響を受けたことが判るが、実はこの影響は時間（～17 時間後）が経つともとなかった領域まで伸びてくる。これは影響のされ方が X 線と違い、ほとんどが戻るのではなく、影響を受けた部分が戻りきらず、どんどん悪くなってしまふのである。こういう細胞は、次の細胞周期、次の増殖期に至るまでに死ぬかもしれない。即ち Apoptosis が起きている。したがって、X 線を当てた場合と、重粒子を当てた場合では、細胞の振舞いは核の損傷修復という意味ではずいぶん違ったものになる。LET に対しても依存性がある。このコメットで解析した核の損傷度に関しても、やはり LET に対して依存的であり、線量への依存性も当然ある。どちらかという、100keV/ $\mu\text{m}$  以下のところにピークがあるように見える。

離散的なイベントを考えないと生物影響が解析できない、あるいは間違った解析になるという、別の例を示す。少し古いデータだが、毛利さんが乗った時のもので、これは放医研の岩崎先生に教えていただいたのだが、アルテミアというコンネンエビの卵を宇宙に持っていき、1 週間ほど宇宙に滞在させる。それを持って帰り、地上で水の中で孵化させると幼生が出てくる。早い

時期に幼生をすり潰し、その中の細胞を取り出して通常0~1しかないピクノーシス(微小核)を数える。その卵をCR39の上に載せて、粒子が明らかに通過した卵と、通過しない卵に分けて、各組織の細胞の中に現れるピクノーシスの数をグラフ化したもの。

地上のコントロールでは、粒子の当たる頻度はポアソン分布をしているが、当たったか当たらないかを全く無視して解析しても、ほとんど有意差は出ない。ところが当たったものだけのピクノーシス数分布をみると明らかに違う。こうした解析のように、当たった卵と当たってない卵を分けると、ある程度の分布差が有意に現れるが、これを全く無視して行くと、混ぜたものは統計的な有意差がなくなってしまふ。つまり、影響を解析する場合、均質モデルで解析しても有意差はでないが、当たった部分だけ集めて母集団として解析すると、離散的な影響があることが分かる。

もう一つ考えなければならないのは、時間というファクターである。低線量率で生物影響を研究する場合は、時間が長くかかる。私がやったのは、最低でも短い時で1-2週間、中性子では3ヶ月や半年。こういう実験では、放射線のイベントが起きてから、生物の反応が起きる緩和時間みたいなものがどのくらいかが問題になる。何故かという、高線量率でドンと当てると全ての分子が全部励起され影響が一度に出るが、ゆっくり当てて行くと各細胞の中で様々なレベルで起きている緩和時間が積算されるので、一部は緩和してしまい、あたかも影響がなかったように見える。一例として、先ほど出たがん抑制遺伝子 p53 についての実験がある。WI38 という細胞の中の遺伝子

が、炭素イオン 8Gy を当てた後 20 分以内に出て何倍にもなる(それから約1時間で下がる。)。こういう反応が比較的早く細胞の中で起こる。これは p53 遺伝子が放射線の影響で誘導され、タンパク質が出て、また次々の反応がカスケード的に起きたためである。

### 【質疑応答】

Q:これはタンパクでなく RNA ではないか。

A:タンパクも同じように出る。分析のため、細胞の中で起きている遺伝子を探した。これは、p53 だけでなく、神経系細胞 T98G に炭素線 4Gy、8Gy という比較的低い線量を当てたものである。

\*\*\*\*\*

先ほどは 40Gy、80Gy でアポトーシスを起こさなかった細胞でも、実は 4Gy、8Gy で遺伝子は動いている。一旦下がった遺伝子がここから先切れているが、18 時間後にまた上がってくる。これは実際に確かめられていて、早い遺伝子発現もあれば、極めて長い日単位で変わる反応もある。生体の中、あるいは細胞の中で起きている反応の緩和時間は一様ではなく、長いのも短いものもある。組織レベルでは、さらに長いものもある。そういうものが、低線量を長期間当てるとどういった時間的移動性を示すかを、もう一つの問題として上げたい。p53 の他に、ATM、DNA-PKcs 等の遺伝子があるが、いずれも短い周期と長い周期があるように見える。

地上ではこのように芸の細かい実験ができるが、宇宙ではそういかない。今まで宇

宙に色々と試料を持って行った。1992年から日本の実験が始まったが、持って行ける物は限られている。宇宙放射線の研究では何らかのドジメトリーを物理的に計測しなくてはならない。これは道家先生のチームにお願いしたが、パッシブなCR39とかTLDぐらいしかできなかつた。初期の頃は、さきほど見たアルテミアの卵とか、あるいは枯草菌、植物の種などを持って行き、それから色々な先生に参加して頂いて、もう少し手の混んだ実験、例えば大腸菌の変異株を持って行くとか、プラズミドDNAを中で取り出して見るとか、あるいはもっと原始的な生物をよく持って行った。もう少し進化した生物だと、酵母、枯草菌、さらには昆虫の卵、ショウジョウバエを扱ったが、この頃からリアルタイム計測が可能になったので、宇宙放射線計測がある程度正確になった。あと中性子も測れるようになった。最近放医研とNASDAが協力して行っている。

しかし、今までシステマティックにアプローチをしたことはなく、むしろその場でスポット的に行った。結局、今までやった宇宙実験の多くはfeasibility studyで、よく分らないこととはっきり分ったこと、ほとんど影響のないこと等が区別できるようになってきた。

次に話すのは、宇宙放射線ではなく、DNAの修復酵素群、VITOの修復反応を宇宙で見たり、無重力影響との相関の有無を調べたりする実験をしたことである。これは要するに化学反応だから、影響は少なかった。比較的影響があったとはっきり言えるのは、真核生物でも一番原始的な酵母の場合であり、生存率と突然変異率が変わったことである。細胞性粘菌については原因がまだ分

かっておらず、第1世代はいいが、第2世代では孢子が出てこなかった。動物の培養細胞を使った実験では、培養状態で持って行けなかつたので標本にして持って行ったが、DNA修復系が全く働いていない所でどのくらい切れるかを見たところ、かなりの影響が見られた。

1992年には、池永先生と、ショウジョウバエと体細胞の突然変異の実験をやった。これは余り影響が出なかつたが、劣性致死突然変異はなぜか測られた線量に比べてかなり高い変異率を示していた。もう一つ、p53やストレスタンパクを産むもの、ラットや鯉を宇宙に持って行ったところ、宇宙に連れて行って戻っただけで、予測以上に増えた。今は何か影響がありそうだという程度だが、果たしてこれからどうなるか分からない。初期にやった原始的な実験では、ほとんどが乾燥か(大腸菌をアガロースで)半乾燥にしたパッケージだった。

私見として今後何をすべきかについて述べると、物理の方と協力して、局所的にローカライズした放射線影響を評価する方法を確立したいと思っている。なかなか難しいが、一つは直接的な同定法の開発ということで、細胞なら細胞、組織なら組織そのもので、どこにどの程度の影響があったかを見る*in situ*の同定法がほしい。同時に、先ほど言いかけたような統計的に評価出来るような、ちゃんとした数理モデルが欲しい。そしてそれを確かめるため、マイクロビームをまばらに当てて、そのモデルに合うかどうかを検定することがある。そこが片づかないと、人への影響を考えると、どういふ統計手法を使ったらいいか議論できない。

## 【質疑応答】

Q. マイクロビームというのはどの程度のものか。

A. 数ミクロンあればいいのではないか。細胞核の大きさが数ミクロンで、そこに当たったか当たらないかが判ればいいので。細胞自体は 10-50 ミクロンであるが、細胞質に当たったか核に当たったかが分かれば、ある程度詳しい議論ができる。

Q. それは今までやられていないのか。

A. 始まっている。細胞質に当たってもその近傍に影響が及ぶバースタンド効果指摘されているが、一個一個を観察することになるので数をこなすのは大変。ある程度統計的にこなさなければいけないが、マイクロビームで 50 個の細胞を一個ずつ照射するのは大変なこと。

Q. 標的にパラパラと当ててみたらどうか。イベントヒットしたのは分かるだろう。

A. 物理的な評価と一緒に是非行いたい。ミクロレベルで生物評価できるという手段が無いと、離散的影響のきちんとした評価は難しい。特に若い人はそういうものに是非チャレンジして欲しい。

\*\*\*\*\*

生物系では、DNA 修復、タンパク質の発現、シグナリング、突然変異、アポトーシス、がんなどがよく研究されている分野である。それらはもちろん必要で興味深い、それ以外にも、宇宙放射線影響が他の環境因子にどれだけ影響されるかという考察も面白いと思う。特に宇宙では、微小重力と

相関があるらしいと言われている。さきほどのショウジョウバエの劣性致死突然変異率が非常に高いのも、他の因子を全部排除して考えられる微小重力との相関しかない。外国でもそのような宇宙実験例があり、微小重力では生体内で変な反応が起きていて、それが放射線影響と相乗もしくは相関するのではないかとされている。最近地上でも、福井大学の松本さんが初めて過重力で遺伝子発現が変わっていることを突き止めているので、あながち嘘ではない。このあたりが面白い研究領域と思う。

また、低線量と高線量で生物影響がどう違うかという点。昔から言われていることだが、閾値の有無、そのメカニズム、あるいはホルミシス効果は有意か否かという問題。もう一つは先ほど言ったように、低線量率被ばくと高線量率被ばくで生物影響がどう違うかということも、宇宙放射線研究においては是非取り組まなくてはならない。フレア等が起きた場合はある程度高線量率被ばくになると思うが、通常の長期被ばくでは高線量率とはいえない。時間依存性は今まで調べられていない。ここにもっと着目してデータをとるべきだろう。RBE 等も同じかどうか分からない。ただ、そこまで実験できる実験設備が無い。また放射線防護の立場から見ると、動物、生物実験の結果がどの程度人体影響に拡張可能なのかを考えなければならない。動物モデルでの人体影響評価法が妥当かという、一般的な医学的議論につながる。

その他、個人的には、細胞の生存戦略と自殺戦略に分けて考えた場合に、生存戦略としては色々なメカニズムがあるという点に興味がある。損傷修復もあるが、ストレ

スへの適応応答もある。例えば私たちの神経細胞は放射線ではなかなか死なない。神経細胞は非再生系細胞だが、これがなぜ放射線に強くなるのかということ、生存戦略という眼で研究してみたい。逆に、だめな奴を追い出してしまう自殺戦略としてアポトーシスがあるが、どこのレベルからアポトーシスは起きるのか、生物学的な起源がいつで、どのレベルからこの機能が細胞に備わって来たのか、というところが説明できれば面白い。宇宙放射線は細胞進化に本当に寄与して来たのかどうか等、いろいろ面白い対象がある。夢みたいな話だが、若い人にもっと取り組んでもらうと面白い研究領域になるのではない。

あと、宇宙放射線の場合、地上とは線源が異なる。地上では、エックス線管、 $\gamma$ 線源、中性子線源、原爆、原子炉、加速器などがあり、線量率も線量も高い所にエンドポイントを設定しているが、宇宙放射線はそうっていない。加えて、疫学データがほとんど無い。先日 NASA の Cucinotta さんが白内障の疫学研究を紹介していたがそれが唯一あるくらいで、きちんとした疫学データ、人体医学データが無い。だから果たして何をエンドポイントにするのかが研究レベルで分かっていない。しかも線量率が低いから、果たして本当に長期間浴びて良いのかという点はまだまだ分からない。どういう形で生物影響を人体モデルに拡張するのかという点は難しい課題。宇宙を対象として生物影響の研究をやってきたのはこういうところにある。大腸菌やイーストやショウジョウバエのメカニズムのフィジビリティを探ってきたが、動物細胞を本格的に使って宇宙放射線の影響を調べた実験は極めて少ない。動物細胞を持って行くのは

大変だが、例えば骨とか神経系あるいは別の組織について、放射線生物の専門家以外の方が細胞を宇宙に持って行った例は非常に沢山ある。しかし、放射線生物の専門家が培養細胞を持って行く実験はほとんど無かった。こうした実験は是非やらなくてはならない。それをやることで、今まで宇宙に他の分野の先生が持っていった培養細胞のデータも、実は放射線の影響だったという可能性も高まるかもしれない。

マウス、ラットのような小動物については、放射線影響を調べるために連れて行くのではなく、生理学の研究のために連れていく実験があった。その際、ラットの内臓や脳が使われてしまったので、どこか余った組織を下さいと言ったら、皮ならあるという。そこで皮膚を分析したら、p53 が多く出てきた。その後は NASA も認識して組織をくれるようになった。むしろ生理学等の実験で使う動物を積極的にもらって、組織から動物としての放射線生物影響のデータがとれるようにしておくべきだと思う。人体影響との間にある壁は厚いが、これをどう結びつけて推定するかの議論は、もう少しデータが得られないとできない。地上においても、動物で得られた薬剤データを人間にどうやって拡張するか等、この辺りの医学研究には大きな議論がある。これがやれるのはまだまだ先の話であり、火星に本格的に行くようにならないとできないかも知れない。

エンドポイントには色々なものがある。遺伝子の安定性に関わる指標は、かなり専門的な話なので簡単に触れるに留めるが、染色体が切れること、あるいはサテライト配列と言って遺伝子の中にある特別な繰り返し配列や、テロメアと言って遺伝子の一

番端についているもの、ミトコンドリア、また HPRT という遺伝子についても最近よく聞かれる。発癌に関連する指標としては、p53 を中心としたノックアウトマウスによる発癌誘発率、発癌誘発率の臓器分布等、色々ある。このあたりは手探り状態。また、ミクロな指標としては、タンパク質の発現、遺伝子の発現、DNA を損傷したり治したりする時に出る遺伝子、また核内部の直接的な切断等がある。このようにいろいろなものがあるが、もう少し集中的にデータを集めないと、どの指標が人体影響に拡張できるか分からない。

#### 【質疑応答】

Q: コメット法による実験の細胞はどのようにして選んだか。

A: どういう細胞がいいかということで神経を選び、もう一つ p53 の expression が違うものを選んだ。また WI38 はクロモソームの数が 2 倍くらい多いので、コメットが見やすいと思った。

Q: その図でカーボンは突き抜けるか。

A: 高エネルギー (290MeV/u) だし、試料自体は薄いので突き抜ける。

Q: LET はいくらか。

A: 50 から 80keV/ $\mu$ m である。

Q: 放射線の影響を考えないで行って、放射線の影響が認められるような実験例はあるのか。

A: ニューロラボの実験で、脳の神経ネットワークが無重力でどう変化するかを見る目的で、ネズミの胎児を使って行った実験がある。

Q: バイオドシメトリーとしての方法は何か。

A: きちんとしたエンドポイントはまだ決まっていない。ルーチンで処理できて、生物影響が推察されるような線量評価システムがあればいい。マイクロアレイのようなシステムが使えるといいが、まだ指標となる遺伝子が見つかっていない。

## 「宇宙飛行時の放射線防護のためのキーワード」

飯本 武志 (東京大学)

### 【講演内容】

ICRP で宇宙飛行時関係のタスクグループ (以下、TG と略す。)が本年4月に立ち上がり、活動を開始した。本来は TG メンバーより解説するべきだが、ここでは私の知っている範囲で紹介する。

現在までの ICRP 勧告の中で、主に Publication 60、そして職業被ばくに関する Publication 75 の2つに宇宙飛行時の放射線被ばくに関する記述がある。職業被ばくとして考えなければいけない自然放射線には4つあり、(a) 規制当局が決めたラドン関係、(b) 自然環境のなかで線量レベルが高いもの、(c) 航空機被ばく、(d)宇宙飛行による被ばくとなっている。残念ながら、ICRP 報告書にある記述はこれだけで、その後詳しい指針は全く出ていない。そこで“Radiation Protection in Space Flight ” という名前の TG が Committee4 の中に立ち上がった

設立目的は以下のようなものである。「ISS が計画進行中であり、今後低軌道 (Low Earth Orbit : LEO) での生活、作業が増えるであろう。当然、地上とは環境が大幅に異なり、高エネルギー、高 LET の放射線が多い。宇宙飛行時に関する個人被ばくの評価と管理が必要になると ICRP の報告書にあるが、具体的指針は無い。そこで、それを作るために TG が立ち上げられた。」となっている。現在の宇宙放射線に関する防護体系の運用

は、ご承知のように国や地域ごとに違う概念、手続きとなっている。この TG ではそういう現状を認識しながら、2002年4月から2年間の活動の中で防護の最適化という範囲まで含めて検討し、宇宙の生活や作業に関する防護体系を構築し、必要となれば特別な線量レベルを考えることを最終目標とする。2004年にドラフトの報告書を作る。

Chairman は東京大学の小佐古敏荘氏で、ダブリン大学のマッコリー氏 (Ian McAulay) は Radiation Protection 85 をまとめた時の委員長である。Radiation Protection 85 は欧州の航空機被ばくについての勧告を記したものだが、航空機被ばくの専門家としてこの TG のメンバーに入っている。ケース氏 (K.R. Kase) は米国の保物学会の会長であり、NCRP の宇宙放射線関係の報告書に深く関係している。特にその人脈の広さから、氏より様々な情報が入ってくるのが期待される。ロシアのサコヴィッチ氏 (Vadim A. Sakovich) は、ロシアの科学研究センターに所属し、ロシアにおける宇宙線被ばく防護分野の実質的な最高責任者と聞いている。なお、同氏は Committee 4 のサブキン氏の推薦で入ったもの。以上4人が放射線防護体系を作る正式メンバーである。その他に数名の Corresponding Members として、マックウェバン氏 (Andrew C. McEwan) がニュージーランド政府の放射線防護委員会の委員長であり、オランダ環境省のズール氏 (Ciska

Zuur) は ICRP Committee 4 のメンバー。ドイツ Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) のディーツェ氏 (Gunther Dietze) も同じく ICRP Committee 4 のメンバーである。エレン・ベーカー氏 (Ellen Baker) は NASA の現役女性宇宙飛行士であり、ステークホルダー (stakeholder) として入っている。そして、著名なヴェッター氏 (Richard Vetter) は NCRP のこの分野における委員長である。スー氏 (Zhenhua Xu) は宇宙医療技術研究所所属で中国のパン氏の推薦である。

4月に TG 4人のメンバーが来日し、東京で一週間議論をした。これが実質的活動のキックオフである。まだサイエンティフィックな所まで話が届かず、ロシア、米国、欧州の現状を持ち寄り、2年後のドラフトの目次のなものを作成するにとどまった。今回は9月か10月、サコヴィッチの研究所で行う予定。

米国では既に NCRP のレポートの形としてガイダンスが出ており、運用が開始されている。例えば Report 98 では space activity で受ける放射線についての guidance、Report 132 では LEO に関係する防護、Report 137 では event-based method (EBM) のマイクロドシメトリ。日本でも ISS 用に NASDA が報告書をまとめているが、これらを見ながら全体としての防護体系を組み上げていく手続きになるだろう。

4月に TG の会議を開いた際、東大山上会館でミニシンポジウムを開催した。宇宙飛行の radiation safety についてのもので、42名が出席。TG のメンバー4人を中心に情報交換等をした。最後に4人は NASDA を訪れ、嶋田、山口が同席してディスカッションし

た。ミニシンポジウムの目的は、各国の体系がバラバラで、それをバラバラに運用している状況を整理すること。小佐古氏の考えは「入った情報は TG だけでなく多くの人で共有し、シンポジウムで持ち寄ったものを各自が持ち返し、その後また意見をまとめて2年ほどかけて良い報告書を作ろう。」ということである。今後もシンポジウムが開かれるだろうから皆の参加を願う。

シンポジウムでは4人の委員が30～40分ほど話をした。ケース氏は NCRP のドラフトの内容について紹介した。すでに NCRP の次の新しいドラフトを作成中であり、LEO 対策をさらに詳しく掘り下げた内容が加えられるらしい。まだ決定ではないので、内容の取り扱いに注意しつつ少し述べる。マッコリー氏は EU の航空機被ばくについて紹介した。ロシアのサコヴィッチ氏は、ロシアでどういう形で放射線防護を取り上げ、どう運用しているかを紹介した。残念ながらサコヴィッチ氏は英語が不自由で、4人のメンバーの作業も科学的に深いところまでは踏み込めなかった。今回はロシアで開催される予定なので、ロシアの状況についてもっと掘り下げた議論ができればと思う。日本からは小佐古氏が NASDA の報告書を中心にして紹介した。

現在の防護体系から考えれば、宇宙放射線防護にも、正当化、最適化、線量限度の3つの柱があるべきだが、正当化と線量限度は分かり易いものの、最適化が難しい。特に、宇宙被ばくをどう最適化するか、今のところ全くアイデアが無い現状である。地上では、最近では ALALA からステップアップして、線量拘束値が守られていれば最適化できていると考えるのが一般的である。従って線量拘束値を宇宙飛行士の被ばくに

導入できるかどうかが議論になるだろう。ケース氏によれば、最適化もしくは線量限度をどうするかを考えるためのレポートを NCRP が書き始めているそうである。その作成者は、運航乗務員、運航ディレクターの他に、運航医務担当、放射線防護と健康管理のオフィサーも入る可能性がある。また、宇宙放射線グループの解析員グループも加わってドラフトを作る。線量限度は従来通り、確定的、確率的な影響に分けて、骨髄、水晶体、皮膚について粒子毎に RBE を仮定して Gy equivalent で決める手順となっている。確率的影響は生涯の過剰リスクを 3% として、年齢別、性別に決める。NASDA は NCRP の活動を横目で見ながら行っているのと同じやり方を踏襲している。最後に海外からの 3 名の TG メンバーが NASDA を訪れ、担当の嶋田氏、山口氏が同席してディスカッションした。

このワークショップでは、4 人の TG メンバーが 4 つの場所を回って話しを完結させていく。次のロシアでの会合では、ロシアにおける研究を深く掘り下げ、ケース氏がいる米国に行った時には NASA も交えて話を詰め、横並びにしてもう一度確認することになるだろう。今のところこれ以上の情報はない。

ここでもう少し各氏からの情報を掘り下げたい。ケース氏の作成した表を見ると確定的な線量限度を Equivalent Dose として一応の数字が出ている。確率の方は、ライフタイムのリスクとして 3% を狙って、年齢別に宇宙飛行士を開始する年齢を 25、35、45、55 と 10 年刻みで代表値を出して、性別年齢別に線量限度をシーベルトで示す。切り方、仮定が少し違うが、NASDA も全く同じ手順

を踏んでいる。NCRP も従来のやり方を変えていない。宇宙飛行時の放射線のほか、宇宙飛行士になるための飛行訓練、医学検査の線量も考慮に入れるようだが、NASDA も同様。以上が、現在 NCRP のドラフト作成に当たって出てきている事項である。

その他、宇宙放射線環境の監視、線量評価は、従来言われているように計算と測定を平行して行わなくてはならないこと、使用する測定装置、具体的に粒子、エネルギー別に測定器の校正方法、その他生体線量計を入れたほうが良いことも、数行だが書かれている。また、NCRP ドラフトは、教育にかなりのページを割いている。搭乗員からアナリストまでをメンバー別にどの内容をどのくらいの時間行うか、細かい内容が表になっている。

次に、サコヴィッチ氏が自著論文を中心にロシアの現状を紹介した。テクニカルな内容というより、全体の考え方を著わしたものである。現在ロシアの放射線防護体系では、低軌道と惑星間飛行の両方を同時にコントロールしようとしている。遮蔽された人体についての計算方法、飛行期間 3 年までの放射線防護、宇宙飛行時の放射線測定に関する要件が幾つか紹介されている。線量計算では、宇宙船の構造、装置、防護服を考慮している。またその計算には人体の数学ファントムを導入している。宇宙飛行 3 年までの場合、宇宙放射線防護では確定的影響と確率的影響の両方を考慮するという考え方は同じだが、方法論が少し異なるところがあるようだ。すなわち、生涯リスクを考えるのではなく、飛行中の被ばくによってこの先何年間に死亡する確率の増加をリスクと考えているようだ。1 年間飛行

した場合の被ばくリスクは、地上にいる30歳の一般人の病死と同じレベルであることを横目に見ながら、1回あたり500mSv、大体12ヶ月で0.665Sv、生涯では4Svを限度にしようという提案が書いてある。ロシアは全く異なった防護体系を使っている印象をもった。1回の宇宙飛行で数100mSvを超えれば確定的な影響は出てきそうだが、サコビッチ氏は「我々のガイドラインを守ればそれは出てこない」と言っている。今回のロシアでの会議ではなぜその結論に至ったかについて詰めなくてはならない。現在の地上での放射線防護体系には、現在放射線傷害の修復は入っていない。一方、ロシアでは、修復の考え方を入れているので、違いが生じている可能性がある。

以上のような情報交換を基にキーワードを整理し、2004年を目標にしているICRPの報告書のドラフトの骨格、章立て案を示したのが手元に配布した資料である。

全体の流れはNCRPもNASDAも同じだが、現在ある放射線防護のシステムをどのように宇宙飛行に応用するか、というアプリケーションが問題である。その中に、正当化、最適化、線量限度の応用の考え方を示している。

問題になったのが、4番目の宇宙放射線生物学である。RBE、線質係数をどうするか、放射線荷重係数と組織荷重係数の値をどう設定するか混乱があるようだ。すでにこれについては三菱総研の岩井氏が指摘している。これについては岩井氏自身が近々日本保健物理学会誌にて発表する予定だが、ICRPはこれを全く認識していなかったようであ

る。ICRP74でPub.60を使うといいながら、 $w_T$ についてはPub.26に戻っている。ICRUの記述ではこれを使おうと言いながら、また別の数字が出ているというように、ICRPとICRUが入れ子になっている。どの値を使って計算すれば良いか、整理を要する。実際に、宇宙放射線防護に当たってどのファクターを使えば良いのか、他の委員会にも投げて確認する必要がある。

参考資料は、ICRPのPub.60とPub.75から、今後防護体系を作る流れの中で宇宙飛行に当てはまりそうな部分を抜き出したものである。最適化の方法がポイントになるだろう。

#### 【質疑応答】

Q:低軌道とはどのあたりか。

C:捕捉放射線帯にひっかからないということである。宇宙ステーションが運用される軌道は上空約400km、数年経つと数10kmほど上がるので、大体そのくらいの範囲を指す。

A:低軌道ミッションでは、NASDAも横目でいろいろと見てやらないといけないので、苦勞していると思う。

C:この先10年で搭載できるものは予算的に大体決まっている。その範囲を越えるものを書かれても困るだけで、それ以外の機器を利用することはないだろう。

Q:電子線や $\gamma$ 線などの高エネルギー放射線は考えているのか。

A:現時点で紹介されているRBEに関して

は、あまり意味のあるものとは言えない。

Q:ICRP と ICRU のファクターが入れ子になっている問題について、どちらかの計算がおかしいということか。

A:それを推奨した勧告を再度整理する必要があるという意味。理由があるはずで、使い勝手の良さ、悪さもあるかも知れないので、確認する必要がある。皆が調べて欲しい。

C: 欧州では既に航空機に関して意見統一があるので、ICRP が本を出すということについて、欧州宇宙庁は「今頃そんなことやって遅れている、アメリカでも既にドラフトが出来ていて、NASA も参加しているようだ」と驚いた様子だった。

A: 藤高の紹介で、NASA が数名入って直接コミットしたいという方がいるという話を聞いている。2002 年 1 月時点のメンバーは、先ほど説明した 4 人のメンバープラス corresponding member で、これに新たに NASA のメンバーが加わることになるだろう。基本的には情報交換ができて専門性の高い人であれば、必要に応じて入ってくるのではないか。

Q: NASA の HQ から、一体どのようなことをやっているのかという問い合わせがあったが、その後連絡はしているか。NASA の HQ の放射線健康プログラムからも誰かを入れないとおかしいと思う。

A: TG のメンバーであるケース氏から NASA に情報が入るだろう。小佐古氏からは連絡していないと思う。

C: NASA は、NCRP は見ても、ICRP は見て

いない。

C: ICRP の委員会の報告書に目を通したが、その報告書において、ICRP は NASA のエキスパートを招きたいとはっきり書いてある。

C: NCRP のドラフトには NASA の名前が出ている。ジョンソンスペースセンターの人が書いたようだ。エレン・ベーカー氏がどの程度協力してくれるのが重要。

C: NASA の HQ はベーカー氏の参加を知らなかったようだ。

C: NASA の HQ とジョンソンスペースセンターの間の問題ではないか。少なくとも、エレン・ベーカー氏がメンバーに入っている以上、実務的には完全に NASA は入っている。

C: エレン・ベーカーは完全にステークホルダーなので NASA スペースセンターとは別と考えるべきかもしれない。

A: 基本的考え方としては、ステークホルダーの意見を聞いたり情報交換をしながら、生涯リスクの 3% を容認できるかという点を審議していくことになる。作業者の場合は、50 年間そのままだが、宇宙飛行士の場合は、ある限られた期間、限られた回数しか乗らないので、割る数が小さくなって線量限度が高くなる可能性を残している。従来の ICRP の考え方に沿って防護体系を考える必要上、このようなメンバー構成となったと思う。

C: NASDA と ICRP の関係について、「殆ど同じ作業をしているので一緒にやったほうが良いのではないか。」と提案したことが

あるが、「ICRP は直接 NASDA が従うべきものを作っているわけではない。」というのが NASDA のマネージャーの見解だった。

うまく調整を図りたい。

C : ドラフトに対する意見を汲み上げる作業はやったのか。

A : 4 月に TG の会議を 2 日半行ったが、最初の 2 日間で情報交換と問題点を挙げ、最後の半日で手元資料のようにまとめた。

Q : 本件について NCRP が概要を出すという話を聞いたが、その後状況について何か聞いているか。

A : この内容に近い事をケース氏が日本の保健物理誌に書くという話をしていたようだ。早ければ次々号くらいに掲載される可能性がある。

C : NCRP のそれを見て NASA が従うのであれば、重大なインパクトがある。我々もどう対処するか決めなくてはならない。

Q : 測定器についていろいろ並べられているが、そういう測定器を実際に搭載したいという狙いがあるからで、本質的な意味は少ないのではないか。

A : 情報はないが、議論を見る限りそのような感じは受ける。これを測るためにこの測定器がいい、という観点でなく、とりあえず、既存のもの、すぐに使えるものを挙げたという感じである。

Q : RBE の話があったが、宇宙環境で磁場のない空間に出た時に一番気になるのは GCR である。それについて触れておらず、高 LET ばかり気にしているようだ。このような

委員会で、こういうものの方が本当は重要だと意見を言えば、それが反映されるのか。

A : あくまでドラフトなので、TG で作ったこのドラフトも、恐らく章立ても含めて、今後 90%変わると思う。そのレベルのものを今日は紹介している。委員ではない私が話していることで恐縮しているが。

Q : 2004 年に報告書がパブリケーションされるということか。

A : そうではなく、TG としてのレポートが出来るということ。それを主委員会に提出し、その後、ここをこうしてくれという形で戻って来る。TG が主委員会に提出するドラフトを完成させるのが 2004 年までということである。

Q : ある程度出来上がったなら公開されるのか。

A : その通りだ。

Q : 放射線作業を行う対象者について、NCRP や ICRP のいう対象者はきちんと定義されているのか。

A : されていない。

C : 現在作っているのはドラフトの準備なので、刊行はかなり先という話である。米国の民間宇宙飛行については、NASA ではなくて連邦航空局 (FAA) が、パイロットの選抜基準を含め、乗客の医学基準等を着々と作っている。時間的なスケールを考えると、ICRP も宇宙へ行く人全員を対象として考えて欲しい。

Q : FAA 以外は 2005 年の改定を目指してい

るようだが、その中に入るのか。

A : よく判らないが、間に合うかどうかの問題だと思う。

Q : 2005 年というのとは何か。

C : 2005 年を目標に、Pub. 60 の大改訂をやるらしい。その中に含まれるのかどうか。

A : 今ホットな議論になっているものの、防護体系が大幅に変わる可能性は、個人的には小さいように思う。

Q : 環境放射線防護については、それに関する記述を入れるために 2003 年までに提案を出して、承諾を得るということか。

A : 2005 年以降の改訂の中核は環境になるだろう。

C : これも大きなテーマのひとつである。

C : 先週 Committee 4 があり、クラーク氏も出席した会議において、小佐古氏が本日のような話をしたはず。

C : まだ分からないが、来年、宇宙放射線に関する防護について話し合う機会を持ちたいと思っている。小佐古先生も参加して欲しい。

C : ICRP への不満であって、この TG に対する不満ではないが、勧告が出て、例えば一番問題になる放射線荷重係数の範囲に関する勧告が出るが、どうしてそうなのかは事情に良く通じた人しか分からない。例えば、エネルギー 2 MeV 以上の陽子が 5 である。それが、いろんな議論を経て NCRP が検討して、2 から 2.5 になる。NCRP については何故そうなったのかが追いか

けられるが、ICRP に関してはほとんど不可能。今後同様の勧告が出る時には、どのような議論を経てそうなったのかが分かるよう、きちんと情報公開して欲しい。

C : ICRP は、議論の途中で内容を公開して、様々な意見を吸い上げるスタイルに基本方針を変えた。勧告作成の途中で疑問を述べて、内容を変えられるような形をとっており、作成の途中で疑問を投げかければ、回答を得ることは可能。ICRP は NGO なので強制力はないと言われたとしても、日本では、お墨付きがついたものとしてほぼ 100% 受け入れる体制にある。ただし、作成の途中できちんと意見を言わなければならないし、言うべき場がどんどん増えると思う。本件は相手が小佐古委員長なので、どんどん意見を言えると思う。

C : 先ほど述べたようなシンポジウムの開催を増やせば、そういう議論ができる。

Q : NASDA と NASA で調べた結果等は 2005 年頃までにドラフトに入るのか。入れようとしているのか。

A : 存在する情報は全て考慮し、必要になれば入ってくると思う。

C : ただ、NASA と NASDA とで差があるようだ。ISS の放射線運用のワーキンググループと本パネルが協力してはどうか。

C : NASA はかなり怒っていたようなので、日本で開くシンポジウム等で NASA に声をかけてみてはどうか。

C : 放医研ではその予定で考えている。

## 「宇宙放射線生物研究への一考察」

岡安 隆一(放射線医学総合研究所)

### 【講演内容】

放射線生物、特に DNA の修復作用という立場から、宇宙放射線に関する生物影響を考えることにする。放射線生物のセントラルドグマは、電離放射線(今後は放射線と呼ぶ)によって細胞内の DNA に傷がつき、その傷が修復されないか、間違って修復されると細胞死、突然変異、延いては癌化等の深刻な結果に導かれる。放射線による DNA 損傷のうち、DNA の 2 重鎖切断( DNA double strand break: DNA DSB) が最も重要と考えられ、DSB の修復が放射線障害のキーを握っているとされている。このことは、どの DNA DSB 修復欠陥細胞で調べても放射線高感受性を示すことから明らかである。

更に筆者らは DSB 修復にやや欠陥のある BALB/c マウスが遺伝的不安定性を示し、その特性が BALB/c マウスの高発癌率(乳がん・肺がん等)にも関係しているのではとの知見を最近示した(Okayasu, et al., *Cancer Res.* 2000, Yu, et al., *Cancer Res.* 2001)。

宇宙空間に多く存在する重粒子の生物影響を調べることは、宇宙放射線生物学にとって不可欠である。過去 10 年近くにわたり特に放医研の HIMAC を使って、いくつかの貴重なデータが集められて来た。そのうち特に面白い例として、DSB 修復欠陥の細胞を重粒子線で照射した実験がある。X 線等の低 LET の照射では修復欠陥細胞は明らかに強い感受性を示すが、重粒子のような高 LET

の照射では修復欠陥細胞でも、ノーマルな細胞でも生存率は殆ど同じであった(我々自身の最近の結果もこのデータを裏付けている)。このことは重粒子によってできる細胞内の(特に遺伝子)損傷は、X 線などと比べより複雑で修復されにくい故、修復欠陥の有無は意味をなさなくなっていると考えられており(Eguchi-Kasai, et al., *Adv. Space Res.* 1996)、更なるメカニズム追求の研究が必須になってくる。

更に少量の重粒子線等の生物影響を測定する手段が提案された。筆者らが過去にデータを残してきた、分裂期以外の染色体を観察する方法として 1) Premature chromosome condensation (PCC) 法、並びに PCC と fluorescence in situ hybridization (FISH)---蛍光を用いて個々の染色体を色の違いにより観察する方法---の組み合わせがある。又最近提案された 2) DNA DSB 修復蛋白 DNA-PKcs の自己リン酸化による細胞染色技法、そして 3) 多数の遺伝子レベルでの発現の違いを短時間で観測できるマイクロアレイ法が提案され、これからの宇宙放射線生物研究への寄与が期待されている。宇宙での生物影響を考える際、放射線以外の要因もかなり重要で、例えば微小重力、その他の生理的変化等は放射線の影響と相互作用をなすことは避けられない状況で、これら複合効果の研究も今後の貴重な課題である。

## 【質疑応答】

Q: マイクロアレイでは、細胞の損傷が色の違いで分かるのか。

A: 例えば、がん細胞で特殊な遺伝子がよく発現しているのが、色のパターンで分かる。

Q: その違いは、線量や核種によって現れるのか。

A: やって見ないとわからないが、十分予想されること。低い線量において違いが出てくるのが期待される。これまでの技術でできなかったのが、マイクロアレイでは、0.001Gy のオーダーで見ることができるかもしれない。

Q: 今後どういう研究を進めるつもりか。

A: 高 LET 放射線の照射実験を始めている。DNA 修復/欠損には様々な遺伝子が関連しているが、そうした遺伝子の関与は高 LET 放射線に対しては違うかもしれない。最終的には、感受性の強い細胞なり動物なりを実際に宇宙船に乗せたいと考えている。それにより、ある特別な遺伝子が何をしているかがはっきり見えるのではないかと思う。

Q: マイクロアレイの実験を宇宙環境で行う予定はあるか。

A: 行いたいとの希望はあるが、具体的な話はない。いずれにせよ、高 LET 放射線の低線量影響について取り組んでみたい。

C: 確かに放射線感受性を左右する遺伝子は何かというのは、1つの研究対象であ

る。いろいろな遺伝子があるがすべて見つかっているわけではない。マイクロアレイのような解析をすると、どの遺伝子がどういうダイナミクスで動いているか分かる。それを、ノックアウトマウス等を用いて検証する。

A: あるいは、RNAi (RNA interference) 技法等を使って、特定の遺伝子の発現を極端に落として検証してみることになる。

Q: 宇宙に持って行って実験する場合には、それではもったいないと思う。他の遺伝子と関係があることを証明するのであれば、まず、どの遺伝子がどういう寄与をしているかということに関して地上で実験すればよい。むしろ宇宙でやるとしたら、遺伝子の不安定性については、細胞の形態によって判断することにして、その違いがどういうメカニズムで起きるか、増えるのか減るのか、といった考察をする方が意味があるのではないか。長期滞在する宇宙飛行士の細胞を継続して観察することとか。

A: 何日あたりからダメージが上がっていくということがあるかもしれない。

C: 遺伝子の不安定性が何をきっかけに起き始めるのかは解明されていない。そこを研究すると面白いかも知れない。

Q: マイクロアレイは感度が上がるというのは、統計的にという意味か。

A: そのとおり。遺伝子的ではなく、統計的にということだ。何千何万の遺伝子を同時に解析することで、感度を上げられる。最近がんになった人については、70の遺伝子の発現が高いと転移になり

易い、というように、幅をもって見えてくるという感じだ。それが信頼できるようになれば、かなり有用な情報になる。それで高 LET と低 LET の影響の違いが分かるとか、そういう方向で役に立つのではないかと思う。

C : マイクロアレイを用いて遺伝子群の発現のパターンを観察するのは面白い。

A : ただし、多くの遺伝子が出てくる。最初はラフな実験をやり、発現の多い 50 以内の遺伝子を選んで、その発現パターンを見ていくのは面白い。何千もの遺伝子を全部みるのは難しいだろう。地上で実験をして、遺伝子をカテゴライズして、小さなマイクロアレイを作って解析できると思う。

Q : 細胞の中における遺伝子の非常に複雑な動態、何がどこにいつどれがどう発現するかのプロセスを、ノックダウン法等で解明することができるのでは。

A : RNAi を上手く使えば、多くのことが解明できるはずである。

Q : 宇宙へ資料を持っていく理由だが、宇宙でしか浴びないような粒子の影響を解明するために意義があるのではないかと思う。地上では絶対に得られないような粒子があるのではないのか

C : 粒子組成は複雑で混在している。しかも低線量域で、地上では得難い被ばく条件である。

C : 宇宙において想定されている問題は、地球の低軌道でどれだけ長い間生活できるかということと、火星に行けるかとい

う場合の 2 つに限られる。後者についてのシミュレートは、リソースがなく難しい面がある。低軌道滞在というのは実際には ISS を指すが、これはアルミの中にいるものですから、アルミの中にいた時の条件でどうなのかという検討が必要である。

Q : 乳ガンのデータについて、0.25Gy で高くなっているのはなぜか。また、線質は何か。

A : 線質はガンマ線。このような低い線量レベルでは、エラーがどのくらいあるかははっきりしない。この効果は線量がゼロでもかなり出てくる。DNA の DSB というのは我々の細胞の代謝の中でも出てくるので、DSB のリペアが原因だったら、当然といえる結果かもしれない。

Q : 感受性の高い細胞では、Mutation も Survival と同じような線形性を持っていると言えるのか。

A : Mutation にはあまり詳しくないが、それは違うと思う。Mutation は 10 の 5 乗に 1 つというレベルである。

Q : Mutation というのは死に損ないであって、Survival と意味合いが違う。

C : セントラルドグマのどちらに行くかだろう。要するに、死んでしまえば Mutation は起こらない。リペア（修復）がちゃんとできれば生きていける。その兼ね合い。

Q : 治る過程が危ないということか。

A : 生きていればがんになる可能性が出てくる。宇宙の場合はそこが非常に大切だ。

如何にちゃんと生きているかどうかで、生物学的効果も違ってくる。非常に難しい話だが、低線量を長い間浴びてどうかという質問に何とか答えないと、本当に役に立つ研究とはいえないかもしれない。

Q：欠損の中で最大のリスクを根拠づける生物データは何か。これ以下はないということが見られる生物データがあるのか。

A：先ほどから考えていたが、2つの修復のメカニズムがある。鶏の細胞では両方落ちている系はあるが、それは非常に特殊で、2大 DSB 修復のメカニズムを駄目にしたらかなり Sensitive になるだろうと思う。私がやろうとしているのは、RNAi を使って、ヒト細胞で1種類の修復欠陥のある細胞を使って、こちらを落としたりどうなるかといったこと。おそらく、かなり Sensitive になると思うが、0にはならないだろう。そうすると、他のメカニズムが働いているということになるからもっと複雑になると思うが、研究としては面白い。

C：細胞とかマウスのような高等動物系ではないが、大腸菌なら容易にできる。動物では難しい。

A：難しいだろうが、DT40では一応やっている。

Q：染色体解析は依然として感受性の高い測定法であるということだが、どの程度低線量まで解析できるのか。

C： $\gamma$ 線、X線で0.02Gyまではできる。これまでの研究では、ヨーロッパの10ほど

の研究所が、何十万の細胞をみて合同で研究したものがよく知られている。計算したのはヨーロッパのグループである。

A：PCCの技術でも、1万くらいのサンプルを分析すれば0.02Gyぐらいまでいけるかもしれない。

Q：そこにストレスがかかってくる場合はどのように考えたらよいのか。例えば宇宙へ行くようなこと。

C：バックグラウンドがどのくらいかということだが、地上で普通の生活をしている状況では、放射線が年2.4ミリシーベルト程度とされていて、その3、4倍ぐらいに相当する影響が活性酸素等によってもたらされる。つまり、放射線による染色体異常とその他の染色体異常が加算されている。言い換えれば、50歳になれば0.6~0.7Gyほど浴びていることになる。

A：他の因子の方が多くなってしまふ。そうすると、放射線の影響は宇宙飛行士の年齢にも依存することになる。

C：あまり若い人は行けないだろう。

Q：では、先ほどの0.02Gyというのは、どのように出したものか。

C：バックグラウンドを差し引いている。その年齢依存カーブについては、上昇の仕方が面白くて、若い時は直線的だが、ちょうどがん年齢に達すると、2乗、3乗で効いてくる人がいる。



## 「宇宙放射線帯予報」

菊池 崇 (通信総合研究所)



### 【講演内容】

宇宙環境は、宇宙飛行士の被ばく、人工衛星異常、通信の安定などに関わっている。通信総合研究所 (CRL) は、通信の安定的な運用を主な目的として、宇宙天気予報というテーマに取り組んでいる。

#### 1. 研究の概要

太陽の表面ではいろいろな現象が起こる。太陽黒点の爆発現象として、エネルギーが放出されるフレア、エックス線や高エネルギーの粒子線が飛び出す、あるいはプラズマ、荷電粒子の塊が飛び出す現象がある。エックス線は8分ほどで、高エネルギーの粒子は速ければ30分ほどで、地球に、地球は磁場で覆われており正確に言えば磁気圏に到達する。宇宙環境とは地球の磁気圏のことを指し、現在、大抵の人工衛星、有人宇宙船は、この磁気圏もしくは電離圏にある。地球の上層大気により我々は保護されていると同時に、地球の磁場で保護されている。地球の磁気圏がもし目で見えたとしたら、遠くから見ると彗星のような形をしている。この中はプラズマで満ちており、そこに人工衛星や宇宙飛行士がいるという状況である。太陽フレアが原因となって起こる各種の擾乱を、宇宙環境を把握して地上の天気予報と同じように予報するというのが、今現在およびこれからの宇宙利用時代のインフラになるだろうと考え、本研究を進めている。

そのために、地上の天気予報のようにコ

ンピューターを用いた数値シミュレーションが盛んに研究されている。来年あたりから、衛星からの太陽風のデータをインプットして宇宙空間でどういうことが起きるかという予想を当研究所予報センターで行いたいと考えている。

シミュレータに加えて、精度の高い観測も必要である。衛星による観測、南極、北極でのオーロラの観測は宇宙に開かれた窓と言われるが、そうした極域の観測、太陽を直接望遠鏡で観測する施設を運営しており、地磁気・電離層観測網の整備も進めている。

1957年から宇宙環境の予報に取り組んできた。かつて短波通信が世界を結ぶ唯一の手段であった。そういう時代から、太陽が通信に大きな影響を与えることを考え、40数年にわたって電波の伝播に係る予報手段を研究してきた。それから、宇宙空間を積極的に利用する時代を迎えて、今の宇宙天気予報に発展してきた。

我々が運営している宇宙天気情報センターでは、毎日宇宙天気情報を外部に提供している。こうした活動を、国際協力により、世界何カ所かの情報センターと連携して行っている。世界の3つの時間帯 (アメリカ、日本及びヨーロッパ) でほぼ世界をカバーできる。

我々の目的は通信が主だが、宇宙飛行士の被ばくの問題もこれから大変重要な問題になってくるだろうし、放射線環境に関する研究および宇宙天気予報の大きな目的になってくるだろう。

## 2. 宇宙天気起因する様々な障害

短波通信は現在でも国際線の航空機で用いられており、極域回りの飛行ルートでは太陽フレアによるデンリソウ現象のほかにオーロラ嵐により通信が途絶えるという問題がある。

太陽粒子現象 (SPE) が起こると、高エネルギーの微粒子が衛星の太陽電池パネルをたたく。これにより劣化が加速される。衛星は宇宙放射線で経常的に劣化しているが、1回の太陽フレアにより何年分かの劣化を起こし、衛星の寿命が一気に縮まることがある。例えば、1989年10月や2001年9月11月等のSPEにより、衛星の太陽電池出力が低下したり、衛星の姿勢が不安定になった。

1989年10月19日の大規模なフレアの時は、21日に北海道で真っ赤なオーロラが観測されたが、この時にはミールの飛行士が情報を受けて船内を移動したという外電が入っている。

衛星そのものが壊れてしまう例として、1994年1月、1997年1月、1998年5月に、捕捉放射線帯粒子によって米国及びカナダの通信衛星の機能が停止したという記録がある。これらは、巨額 (1機あたり数百億円) の損失をもたらすだけでなく、高度ハイテク社会を支える通信インフラが突然停止するという大きな問題を引き起こした。

また、放射線影響とは違うが、2000年7月の電離圏嵐により超高層大気が加熱膨張し、X線天文衛星「あすか」の姿勢が不安定になって、2001年3月には回復不能に陥り落下するということがあった。

南米ブラジル上空は、地磁気強度が小さいために放射線帯粒子が低高度 (電離層) まで降下しており、南大西洋磁気異常地域 (SAA) として知られている。ここを通過する周回軌道衛星の半導体にはビットエラー

が発生する。

1989年3月13日の地磁気嵐の時には、カナダケベック州で、送電線に誘導電流が流れ、トランスが焼損、100万人が9時間に渡り停電の被害に遭った。極域ではオーロラが観測されるが、その中には大変強い電流が流れているため、その下の地上の送電線などに誘導電流が流れると深刻な事態が生じる。この事故を機に、日本の各電力会社も測定を行ったところ、かなり強い電流が流れていた。トランスを焼き尽くすほどのものではないが、加熱されることで一基数十億円のトランスの寿命が縮むことがわかり、各電力会社は我々の宇宙天気予報を使い、磁気嵐の予報が流れると、トランスを複数パラレルで運転し被害を回避するようになっている。

電離層関係では、スポラディック E 層によるテレビ電波の散乱により画像が乱れる。Es 層は6-9月によく現れる。夏にはNHKで「画像が乱れます」というテロップを目にすると思うが、この時期には普段来ない電波がやってきて、場合によってはロシアのテレビも見ることがきる。楽しむ分にはよいが、防災関係など重要な情報が無関係なところに流れて混乱するのは問題である。

また、衛星電波が電離層擾乱によってシンチレーションを生じ、気象衛星画像の劣化や衛星測位の誤差が発生する。GPSを使った精密誘導や航空機の着陸誘導が影響を受けると、深刻な事態をもたらしかねない。

以上のように、衛星障害のかなりの割合 (20-25%) が宇宙環境に起因している。日本の衛星についての事例も少なくなく、火星探査機「のぞみ」も高エネルギー粒子線にたたかれて通信障害を起こしている。

宇宙飛行士や航空機乗務員の宇宙放射線被ばくの心配についても、現在安全基準が

論議されているところであるが、今後大きな問題になってくるだろう。

### 3. 宇宙天気予報研究の意義と研究課題

宇宙天気予報の意義だが、まず、今の宇宙利用もしくはこれから人類が宇宙に出ていく場合（宇宙ステーション滞在や惑星間飛行）の被ばくの問題などに対する支援、つまり人類の宇宙への進出をサポートする戦略研究という面がある。

また、現在非常によく使われている衛星通信や、地上通信のうちにも衛星とリンクしたものが多く、それらを保守し国の安全保障の一翼を担うということ。更に、学術、教育、経済活動を促進し、宇宙科学技術や情報科学技術の分野において大きな貢献をするだろうと考えている。

宇宙天気予報においては、太陽活動、太陽フレア、高エネルギー粒子の加速といったことが研究対象となる。CME やプラズマの塊がくると、約 2 日して地球に到達して磁気嵐が起きる。バンアレン帯というのは磁気嵐によって作られているということが最近分かってきた。放射線環境という点からいうと、太陽から直接来る高エネルギー粒子と地球の磁気圏の中にある放射線帯は区別されるが、この放射線帯は、結局は磁気嵐が発生して粒子がこの中で加速されて、地球磁場に閉じ込められるということで形成されている。低軌道かつ低緯度では影響は大きくないが、高緯度あるいは静止衛星のトランスファー軌道では、放射線帯の影響は非常に大きい。その原因となる地磁気嵐、電離層嵐の研究は重要である。

繰り返しになるが、太陽から地球までの空間、太陽←→太陽風←→磁気圏←→電離圏が 1 つの複合システムになっていると捉えることが必要で、様々なエネルギーの電

磁波、粒子、プラズマがやってきて各種の現象を起こし、その結果、様々な障害が発生するのである。

先端的な観測技術を生かして、宇宙科学研究所の YOHKOH「ようこう」衛星、NASA の SOHO が太陽を観察している。太陽風プラズマや高エネルギー粒子を直接観測する NASA の ACE、WIND 衛星などもある。また、磁気圏観測の GOES 衛星などがある。これらのデータはほぼリアルタイムで受信できるようになっている。衛星観測技術の発達により、10 年前に比べ、宇宙天気の研究は飛躍的に進歩している。我々は、茨城県那珂湊にある平磯太陽観測センターで太陽の観測を行っている。宇宙飛行士の被ばくに直接関係してくる太陽フレアのデータは、晴れていれば毎日とることができる。太陽風プラズマ塊が作られて地球方向に放出される様子を直接観測する衛星を作ろうという計画もある。

宇宙空間の観測で難しいのは、太陽は目に見えるが、宇宙空間は何も見えないという点である。研究を進める上で、また一般の方に理解していただく上で、ここが難題となっている。目で見える現象は太陽と極域でのオーロラのみ。なんとか可視化したいということで、予測シミュレーションについて研究している。宇宙空間における諸々の現象のエネルギーが地球の磁場にそって移動し、北極、南極に集まり、オーロラが発生する、あるいは南極の上層大気が加熱されてそこから風が吹く。その風が世界中の電離層あるいは上層大気を動かしている。そういう環境に人工衛星が回っている。これらを目で見えるようにしたいという研究である。

太陽風の直接観測を行う米国の ACE 衛星というのがあるが、ここからリアルタイム

でデータをとることに我々 (CRL) も協力している。常時太陽方向から電波を受けるため、世界で3か所、アメリカ、日本及びヨーロッパで24時間この衛星からの電波を受けて観測している。非常に大きい太陽フレアが発生した場合でもリアルタイムで受信でき、それから何時間後に大きな磁気嵐がくるかを予測できる。夜間は、オーロラを観測する IMAGE 衛星からのデータを受信している。ACE からのデータで予測した磁気嵐によるオーロラを IMAGE で確認できる。大きな磁気嵐が来た場合には、例えば北海道のオーロラが確認できる。極域あたりでオーロラ現象が起きると、地磁気の磁力線のその延長線上にある日本の実用衛星、放送衛星などの付近に、高温のプラズマが押し寄せていることが分かる。これは衛星のトラブルの原因となり、もし宇宙飛行士がいれば心配しなければいけない状況である。そこで、シベリアに5か所磁力計を設置して、昨年より観測を始めた。データは衛星回線と同時に受信している。シベリアの地磁気のデータを見ると、大規模地磁気嵐の時に衛星の姿勢が不安定になったり帯電現象が起こることが予想できる。

ケベック州の停電事故は、太陽風衝撃波による地磁気変動 (SC) が引き起こしたオーロラ嵐が原因であると考えられている。地磁気のデータとつきあわせてみることで、因果関係がはっきりしてきた。

捕捉放射線帯については、非常にエネルギーの高い粒子が地球の磁場の中に閉じ込められているため、ここを通過すると被ばくや半導体の故障などの問題が生じる。我々のグループでは、磁気嵐の発達および放射線帯高エネルギー粒子の生成について研究しており、高度 800km の低軌道衛星で観測したエネルギーの高い電子のデータ解析に

より、放射線帯の中の電子、イオンがどのように加速されていくかを考察している。地磁気嵐の後には非常に強い放射線が作られていることが分かる。エネルギーの低い粒子はずっと外から入り込んでいる。これは、オーロラ現象が起こると静止軌道に熱いプラズマが流入するというのに対応している。磁気圏の後ろの方から高エネルギー粒子が流入して、それが核になって中でもう一段加速現象が起きる。そしてもう一段高いエネルギーの電子が生成されているのではないかと。それがさらに加速されると、もっとエネルギーの高いものにまで成長していく。

磁気圏の中にどのようにエネルギーが流入するかという研究も進めており、太陽風が磁気圏に衝突するところに巨大な発電機があり、そこから電流が地球の磁力線沿いに流れるといったことも、人工衛星の観測データから分かってきた。それにより電離層の中に電流が流れ込んで一種の送電回路ができていたのではないかと。エネルギーの流れの研究を、そしてそのエネルギーが磁気圏の中で放射線帯の生成につながっていくのではないかとということも研究しているが、こうした仮説についてはまだ研究途上で、これから面白い結果が出ると期待している。

シミュレーション、観測とも、宇宙空間すべてを包括した系の中で考えている。観測では、極域の観測、赤道の観測、中低緯度の観測等、グローバルな規模で必要なデータを得て、他の観測点とも共同でデータを取得している。

予報をする場合のツールとして、シミュレーション以外にもニューラルネットによる予測などといった新しい予報ツールの検討も同時に進めている。ニューラルネット

というのは、多くの経験から法則を導き出して関数化したもので、かなり信頼度の高い予測ができる。宇宙環境シミュレーションモデルの研究も進めており、今年もしくは来年には実際に使っていきたい。ただし、今の天気予報と同じように、宇宙環境の予報に使えるようになるにはあと 10 年くらいかかるかと思う。ともかく、実際に運用しながら更に研究開発を進めていきたいと思う。

既に行っているサービスとしては、ホームページ、テレホンサービス、ファックス、電話による問い合わせに対する対応の他、太陽、電離層、地磁気などに関する CRL 独自の観測データを、インターネット上で公開している。世界では 11 か所に宇宙天気予報センターがあるが、我々が運営する日本の予報センターの他、米国、オーストラリアなどでは非常に活発に予報活動を行っており、お互いにデータの交換や人の交流がある。

### 【質疑応答】

Q：シミュレーションのためのデータ計算の時間や方法はどうなっているのか。

A：ACE などの太陽風を観測する衛星は地球から約 150 万キロ離れており、そこから地球まで太陽風が到着するまでにだいたい 1 時間かかるので、1 時間前のものはわかるということになる。

宇宙関係の擾乱は始まってから何時間あるいは何日も続くのでその間ずっと計算を行っている。実時間よりもスーパーコンピュータの計算速度が遅くてはどうしようもない。現在の能力は充分ではなく、先ほど見ていただいたアニメーションは一晩か

けて計算したものなので、実用に使うためにはかなり間引いて精度を落として計算しないとイケない。三次元の計算になるので将来的にはもっと速いスーパーコンピュータが必要になると思う。

Q：センサーとして自前のものはどのあたりか。365 日ベースでデータがとれるものはどれか。それに加えて、ACE のデータを受信し、GOES のデータを地上回線でもらっているということか。

A：シベリア、アラスカ、赤道、ブラジルなどは、自前の観測点からオンラインでリアルタイムデータが送られてくる。

Q：「ようこう」が使えなくなったが、低軌道や静止軌道では、日本の衛星として 365 日ベースでデータを提供できる日本の衛星センサーは無いのか。

A：太陽観測については無い。オーロラ観測衛星あけぼのと磁気圏観測衛星ジオテールはリアルタイムにはなっていない。ひまわり 4 号までは宇宙環境モニタを装備していたが、5 号からは気象庁の方針で中止になった。

アメリカの GOES のように常時定点観測をしている衛星は無い。日本にも長期戦略的な体制があればよいが。ただ、NASDA が上げる衛星には必ず宇宙環境モニタをのせようというような、一種のポリシーができつつあると思う。ただし、リアルタイムのものは今はない。

C：NASDA のものは、衛星自身の保守のためのモニタであって、宇宙天気予報を目的にした、天気予報に使えるものではないのではないか。

C : NOAA はホームページもしっかり運用している。日本もやるならちゃんとやればいいと思う。

A : そのとおりだと思う。

Q : 私自身よく GOES のデータを見ている。プロトンの 10MeV 以上のデータの変化をみているが、太陽風、プラズマなどいろいろな INDEX があるが、予測に使える Index というのはわかってきているか。プロトンや高エネルギー粒子が飛んでくる可能性を予測するにはどういうパラメータをみたらよいか。

A : 経験的なものだが、長年使われているのは太陽電波のスペクトル。これはかなり確実で、例えば II 型といわれるバーストが出ると変動が現れる。これはよくあたる。IV 型や II 型がでると磁気嵐が来る可能性が高い。

Q : Kp インデックスというのがあるがどういうものか。

A : 地磁気の擾乱指数のこと。地磁気は地球周辺の出来事で、太陽現象でなく、その結果である。衛星の帯電や放射線帯の成長等に直接関係があるデータである。

Q : 大きな影響のあるフレアが起きるかどうかが宇宙飛行士の宇宙滞在に大きく関係することだが、それを予測する手段はまだないのか。

A : フレアそのものを予想するのは大変難しい。フレアのメカニズムは「ようこう」等の様々なデータを基にしてシミュレーションが行われ、議論されているが、決定的な議論までは到達していないのでは

ないか。まして予測というと、前の段階のメカニズムを考えなければならず、非常に難しい。

Q : 現状では、エックス線を同時に計測してその変化によって予測するという方法をとるのか。

A : それは経験的にはかなりの確率で予測しうる。たとえば X 線フレアが M クラス、X クラスとあって、X クラスであればまずまちがいはなく、8-9 割の確率で来ると言える。

Q : 冒頭の話で出てきたロシアの宇宙飛行士が待避したという話は、どんな情報に基づいて待避したのか。起こるだろうという予測か、起こったという事実か。

A : 大規模フレアが起こった後に、その事実が地上からミールに対して通報されたのだと思う。

C : 実際に「待避」といっても宇宙船の中でどうするのか、ISS についてもきちんとした指針は確立されていない。SAA の通過とライトフラッシュの関係も宇宙飛行士から指摘されている。

Q : 太陽電波のスペクトルで精度よく磁気嵐を予測できるというが、だいたい時間的にはどのくらい前に予測できるのか。

A : 磁気嵐を起こすプラズマの塊がくるまでに約 2 日かかるので、2 日から 1 日半前にはわかる。89 年の北海道でオーロラが出た時、我々は 1 日半前に予報を出し、その日の夕刊で報道され、翌日実際に観測された。

このように、比較的時間の猶予がある。しかし、放射線粒子の場合は、場所にもよるがすぐに来てしまう。太陽面の真ん中あるいは真ん中から右側つまり西側のあたりで起こると30分くらいで来る。

Q：太陽の裏の場合だとどうか。

A：縁から向こう側になるとフレアは見えないが、磁力線沿いに来る。実際にそういう観測例がある。

Q：その場合には時間的に多少余裕があるのか。

A：その場合もあまり余裕があるといえない。

Q：フレアが見えても、低軌道上の衛星に影響がある確率は、それほど高くないということか。

A：高緯度でなければそれほど影響ないと思う。スペースシャトル程度の軌道、上空400-500キロでなおかつ軌道傾斜角が小さい場合は問題ないだろう。

Q：大規模なフレアが観測された場合、周回低軌道に宇宙線が来る確率というのはどのくらいか。

A：フレアが起こった場所による。真ん中から東側であればほとんど逸れていく。真ん中ないし真ん中から西側で起こるとほとんど確実に来る。

Q：最終的に宇宙環境が人間にとってどのくらい危険かということを考えて。日本やNASAが考えている規制の問題は、国際宇宙ステーション（ISS）の軌道だけに関しての規制である。だが、そこを外れ

るとどうしたらいいかわかっていない。電磁波、粒子を含めて絶対的にここは安全だ、ここは危険だというマップが描けるのか。CRLの研究と放医研の研究を重ねてみたいと思うが。

A：粒子というと、高度にもよるが、スペースシャトルでも衛星でも、高緯度までいくのか、それとも低緯度のみの飛行なのかがまず問題であり、中低緯度ぐらいまでならあまり影響はないのではないかと。

電磁波の影響については、人の被ばくは考えていない。磁場変動の直接の影響を受けるのは、地上の送電線やパイプライン等の施設であり、磁気嵐の時は電離層が荒れてくるのでその時には上層大気が加熱して衛星の軌道がおかしくなる。しかし人体にはおそらく影響しないだろう。

Q：そうすると、ISSを考えるならば現状で考えられている規制でよいということか。

A：ISSに滞在している人間ということであればそうである。SAAの問題については、飛行する軌道による。磁気嵐の大きい場合は放射線帯がかなり下がってくる。ずいぶん前の研究になるが、太陽プロトンの極域の分布では傾斜角55度くらいから十分影響があると考えられる。シャトルの場合でも57度なら影響がある。

C：シャトルで実測した結果をみても、高緯度の方へいくと重粒子が計測される。

Q：磁気圏から外に出た場合、どのような事象がどのくらいの頻度で心配になるかを知りたい。当面はISSだが、いずれは外に出るであろうから、その場合、何が大事か知りたいと思う。そういう計算は

アポロの頃にされていると思うが、その頃は何で測ったのだろうか。

C：当時はそういう認識は強くなかったように思う。当時の機器やデータを調べようと思えば、調べられると思う。

Q：前から疑問に感じていたことだが、SAAの問題がこれだけ認識されていながら周回傾斜角を変えるという話はないのか。傾斜角の決定が政治的なものだとしたら、宇宙飛行士が気の毒だ。

C：地球全体を観測するには、傾斜角が少しでも大きい方がカバーできる範囲が広くなるというメリットは指摘されている。軌道が斜めになるため、SAAを通過する時

間はあまり関係がないとも言われている。

C：SAAは、確かにGyで測ると線量の9割くらいを占めるが、Svに直すとずっと小さい。20%かそれ以下である。

C：宇宙飛行士がシンチレーションを感じるくらいなのだから、やはり影響は考えるべきではないか。

C：ISSが仮に28度で飛ぶと、鹿児島以南までしか来ない。高緯度で飛ぶことは日本にとって悪いことではない。

C：利用目的もあるが、飛ぶ側の健康上の安全も十分に考えるべきではないか。

## 今後の方針

### III. 今後の方針

平成8年度から活動を開始した本委員会では、宇宙放射線防護体系の構築に寄与することを大きな目的として、これまでの約6年間、我が国における宇宙放射線研究、特にその生物影響と防護に関わる研究の推進を図ることに努めてきた。その努力の成果は、徐々に目に見える形として現れており、着実な広がりを見せている。

例えば、本委員会が属する放射線医学総合研究所（以下「放医研」という。）では、当該分野の研究を国際的な規模で進展させるために、平成11年4月に「国際宇宙放射線研究センター」が設置され、国研（当時）としては稀有な大きな進展を見た。その後、平成13年4月に放医研が独立行政法人へ移行したのに伴い、同センターは、より効率的な研究開発への取り組みを期されて「宇宙放射線防護プロジェクト」となり、放医研の中期目標（平成13～17年度までの5年間）において重点領域研究として明確に位置づけられた。同分野における国際的な研究交流も、放医研を主軸として堅実に拡大し、平成13年3月には、奈良市に於いて、放医研、米国航空宇宙局（NASA）及び奈良県立医科大学の共催で「第2回宇宙放射線研究国際ワークショップ（IWSSRR-2）」が開催され、放医研の宇宙放射線防護プロジェクトのメンバーがその事務局を努めた。

放医研以外においても、本委員会の活動開始後、NASDAにより有人サポート委員会放射線被ばく分科会（委員長：佐々木康人 放医研所長（当時））が組織され、国内の有識者による検討を経て、日本人宇宙飛行士に対する放射線防護基準が平成14年度に策定された。また、国際放射線防護委員会（ICRP）に宇宙放射線防護をテーマとしたタスクグループ（委員長：小佐古敏荘 東京大学助教授）が設置される等、宇宙放射線防護に係る国内研究者の問題意識は次第に高まっており、こうした動きを受けて国内における同分野の研究が活性化してきた。本委員会の活動や刊行物等は、その活性化に少なからず貢献してきたと自負している。

以上のような状況を踏まえ、本委員会では、今後の方針として、宇宙放射線防護研究の裾野を広げるだけでなく、当該研究の質を高める役割に重点をおくこととしたい。具体的には、放医研の宇宙放射線防護プロジェクト等で実施されている研究開発について、その進捗や実績を評価するとともに、それを更に高いレベルへ発展させるため、学術的完成度もしくは社会的有用性といった観点から助言を行うことに注力する。ついでには、助言委員会として平成15年度上半期から実質的に機能できるよう、現委員会の体制（委員構成や審議方法等）の見直しを含め、早急に対応を図ることとする。

付 録

## 付録

### A1. 第2回宇宙放射線研究国際ワークショップ (IWSSRR-2) について

平成14年3月11-15日、奈良市にある奈良県新公会堂において、独立行政法人放射線医学総合研究所、米国航空宇宙局 (NASA)、および奈良県立医科大学の3機関共催で、「恒久的宇宙滞在の実現に向けて」をテーマとした標記国際会議が開催された。本会議は、2年前にイタリア・アロナで行われた第1回に続くもので、宇宙における恒久的滞在の実現において懸案となっている宇宙放射線被ばくの問題とその克服手段について、専門分野を越えた幅広い視野で議論を交わすことを狙いとしたもので、奈良県立医科大学の大西武雄教授が組織委員長を務められ、放医研の宇宙放射線プロジェクトが事務局を担当した。

高エネルギーの粒子線から成る宇宙放射線に対しては、物理的な遮蔽だけでなく、運用上の工夫による被ばく制限や、発がん抑止剤等の生物学的な防護を駆使して、総合的な手段で被ばくの低減をはかる必要がある。より効率的な防護対策を確立するには、物理・環境・生物・医療・工学といった、異分野間の情報交換を活性化し、コストの問題も念頭におきながら、学際的・総合的な研究を推進する必要がある。

本会議でも、とりあげたテーマは極めて多岐にわたり、アブストラクトを適切なカテゴリーに分類するのに委員および事務局はたいへん苦勞をした。最終的に、(1) 加速器を利用した宇宙放射線研究、(2) 宇宙放射線環境、(3) 宇宙放射線防護測定、(4) 遮蔽：物理的防護、(5) 生物影響：生理的反応、(6) 生物影響：細胞応答、(7) 生物影響：遺伝的不安定性、(8) 植物、(9) 医療：生物学的防護、(10) 宇宙利用実験、といった10のカテゴリーを設け、各カテゴリーに対応する Roundtable Discussion セッションを実施した (別添参照)。

本会議では、オープニングセッションおよび基調講演の後、Roundtable Discussion に先立ち、全発表者による3時間程度のポスターセッションをまず行った。各 Roundtable Discussion の進行担当 (Moderator) は、ポスターセッション中に発表者と意見を交わし、そこで得られた新しい知見を加味しながら、自分の Roundtable Discussion セッションを再構成する、という方式をとった。口頭発表のチャンスがあるのか発表者にはぎりぎりまで分からないこと、また Moderator にかかなりの負担を強いることから、果たしてうまくいくだろうかと不安であったが、Moderator およびプログラム委員の献身的なご協力によって、どのセッションもつつがなく進行することができた。たいへんな任務を快く引き受けてくださった諸先生方に、強く感謝と敬意の念を表したい。

会議3日目の午後には、日本人参加者を対象にした特別セッションを開き、我が国

における宇宙利用研究のサポート体制についての説明機会を設けた。続いて、藤田保健衛生大学の長岡俊治教授から「日本宇宙放射線研究会（JASRR）」の設立が提案され、セッション参加者から賛同を得て、長岡氏を会長、大西武雄氏（奈良医大）および谷田貝文夫氏（理研）を副会長、保田浩志（放医研）を事務局代表として活動を開始することとなった。我が国では、ヒトの宇宙滞在を念頭においた宇宙放射線研究はまだ萌芽段階であるが、本会議を契機として、広い視野を持った研究者の輪が広がっていくことを願って止まない。

本会議に登録された参加者は、海外から約 58 名（うち米国 35 名）、国内から約 129 名、合わせて 187 名を数え、どのセッションも盛況であった。晴天にも恵まれ、会期を通じて近年になく温暖な日々が続いた。「お水取り」のイベントや風光明媚な古都の風景を堪能された参加者の多くが「ファンタスティックな会議だった」といった感想を述べてくれた。

なお、本会議で発表された研究成果の一部は、原著論文としてとりまとめられ、*Journal of Radiation Research* 誌の特集号（*J. Radiat. Res.* Vol.43 supplement, "Space Radiation Research" 2002）として刊行された。当該特集号の詳細な内容については、同誌のウェブサイト

（<http://jrr.jstage.jst.go.jp>）を御参照いただきたい。

本会議の準備運営や特集号の査読編集等に御尽力いただいた皆様、寄付や協賛という形で御支援くださった方々に、改めて深く感謝申し上げる次第である。

本会議の次の会合（第3回）は、ブルックヘブン国立研究所のある米国・ニューヨーク州で開かれる予定である。



（文責：保田 浩志）

## IWSSRR-2 プログラムおよび講演者一覧

March 12 (Tue) 16:30-18:35

**Roundtable Discussion-1****Accelerator Facilities for Space Radiation Research**

Moderators: Dr. Jack Miller (LBL) and Dr. Yoshiya Furusawa (NIRS)

Brief Overview			Yoshiya Furusawa
Keynote	A0	LIGHTING FIRES-FULL INTERPLANETARY RADIATION ENVIRONMENT SIMULATION USING PARTICLE ACCELERATOR BEAMS	Walter Schimmerling
	A1	BNL ACCELERATOR-BASED RADIOBIOLOGY FACILITIES	Derek I. Lowenstein
			Adam Rusek
	A2	SPACE RADIATION RESEARCH ACTIVITIES AT THE LOMA LINDA PROTON SYNCHROTRON FACILITY	Gregory Nelson
	A4	RESEARCH PROJECT WITH HEAVY IONS AT NIRS-HIMAC (HEAVY ION MEDICAL ACCELERATOR IN CHIBA)	Michiharu Yamaguchi
	A5	REVIEW OF ACCELERATOR-BASED SPACE RADIATION RESEARCH IN ITALY	Marco Durante
	A6	REVIEW OF ACCELERATOR-BASED SPACE RADIATION RESEARCH IN GERMANY	Sylvia Ritter
	A11	RADIOBIOLOGICAL RESEARCH AT THE NUCLOTRON	Eugene Krasavin
	A8	SYSTEM OF CELL IRRADIATION WITH A PRECISE NUMBER OF HEAVY IONS	Yasuhiko Kobayashi
	A10	RI BEAM FACTORY PROJECT AT RIKEN	Yasushige Yano
	A7	THE CANCER TREATMENT SYSTEM AT HYOGO ION BEAM MEDICAL CENTER (HIBMC)	Yoshio Hishikawa
Brief Summary			Jack Miller

March 13 (Wed) 8:50-10:10

**Roundtable Discussion-2****Shielding: Physical Protection**

Moderators: Dr. Lawrence H. Heilbronn (LBL) and Dr. Takashi Nakamura (Tohoku Univ.)

Brief Overview			Takashi Nakamura
Keynote	S0	INFLUENCE OF THE SHIELDING ON THE SPACE RADIATION BIOLOGICAL EFFECTIVENESS	Marco Durante
	S21	HEAVY ION TRANSPORT MONTE CARLO CODE HETC-CYRIC	Hiroshi Iwase
	S5	EXPERIMENTAL STUDIES AND MODEL CALCULATIONS OF THE FRAGMENTATION OF HIGH ENERGY HEAVY IONS IN ISS MATERIALS	Jack Miller
	S22	INTERNATIONAL SPACE STATION SHIELDING MODEL DEVELOPMENT	Giovanni De Angelis
	S10	ADVANCES IN RADIATION SHIELDING	Ram K. Tripathi
	S19	GEANT4 -A TOOLKIT FOR THE SIMULATION OF THE PASSAGE OF PARTICLES THROUGH MATTER	Makoto Asai
Brief Summary			Lawrence H. Heilbronn

March 13 (Wed) 10:40-12:00

### Roundtable Discussion-3

#### Radiation Protection Dosimetry in Space

Moderators: Dr. Vladislav M. Petrov (IBMP) and Dr. Hiroshi Yasuda (NIRS)

Brief Overview		Hiroshi Yasuda
Special lecture	IN MEMORY OF DR.GAUTAM D. BADHWAR	Stanley Curtis
D3	SPACE RADIATION PROTECTION: COMPARISON OF EFFECTIVE DOSE TO BONE MARROW DOSE EQUIVALENT	Jennifer L. Hoff
D7	INTERCOMPARISON OF RADIATION INSTRUMENTS FOR COSMIC-RAY WITH HEAVY ION BEAMS AT HIMAC (ICCHIBAN PROJECT)	Yukio Uchihori
D14	MODELING OF RESPONSE OF THERMOLUMINESCENCE DETECTORS IN LOW AND HIGH-LET RADIATION FIELDS	Pawel Olko
D11	A DEVELOPMENT OF INTEGRATING PASSIVE DOSIMETERS AND THEIR ANALYSIS METHOD FOR SPACE RADIATION MEASUREMENTS IN NASDA - A DATABASE CONSTRUCTION FOR THE ANALYSIS	Mituyo Masukawa
D19	NECESSARY ACCURACY OF DOSE ESTIMATION	Orlov Mark Yu
Brief Summary		Vladislav M. Petrov

March 13 (Wed) 13:00-14:20

### Roundtable Discussion-4

#### Space Radiation Environment

Moderators: Dr. Günther Reitz (DLR) and Dr. Fumihiko Tomita (CRL)

Brief Overview		Günther Reitz
Keynote	E0 RADIATION ENVIRONMENT AND EFFECT MODELS AND TOOLS IN SPENVIS	Bart Quaghebeur
E1	RESULTS OF THE DOSIMETRIC MAPPING EXPERIMENT FLOWN AS PART OF NASA'S HUMAN RESEARCH FACILITY ON THE ISS	Günther Reitz
E2	ANALYSIS OF THE NEUTRON RADIATION ENVIRONMENT INSIDE THE INTERNATIONAL SPACE STATION AS OBTAINED BY A BONNER BALL NEUTRON DETECTOR	Tateo Goka
E3	MODEL PREDICTIONS AND VISUALIZATION OF THE PARTICLE FLUX ON THE SURFACE OF MARS	Premkumar Saganti
E4	VISUALIZATION OF PARTICLE FLUX IN THE HUMANBODY ON THE SURFACE OF MARS	Premkumar Saganti
E7	WORST CASE SOLAR ENERGETIC PARTICLE EVENTS FOR INTERNATIONAL SPACE STATION MISSIONS	Daniel L. Stephens
Brief Summary		Fumihiko Tomita

March 14 (Thu) 8:50-10:10

### Roundtable Discussion-5

#### Space Radiation Biology (1): Physiological Effects

Moderators: Dr. Marcelo Vazquez (BNL) and Dr. Shunji Nagaoka (Fujita Health Univ.)

Brief Overview		Shunji Nagaoka
Keynote	H0 DOSE RESPONSE FOR CATARACT INCIDENCE IN ASTRONAUTS	Francis A. Cucinotta
H1	CHANGES OF GENE EXPRESSION IN DEVELOPING MOUSE BRAIN: A COMPARATIVE STUDY BETWEEN EXPOSURE TO CARBON PARTICLES AND TO X-RAYS	Takeshi Yaoi
H9	RADIO-ADAPTIVE SURVIVAL RESPONSE IN MICE	Morio Yonezawa
H12	EFFECTS OF EXPOSURE TO <sup>56</sup> Fe PARTICLE IRRADIATION ON SPATIAL LEARNING AND MEMORY BEHAVIOR AND NEURONAL SIGNALING	Barbara Shukitt-Hale
H23	ANALYSIS OF COMPLEX-TYPE CHROMOSOME EXCHANGES IN ASTRONAUTS' LYMPHOCYTES AFTER SPACE FLIGHT AS A BIOMARKER OF HIGH-LET EXPOSURE	Honglu Wu - for Kerry George
Brief Summary		Bernard Rabin

March 14 (Thu) 10:40-12:00

### Roundtable Discussion-6

#### Space Radiation Biology (2): Cellular Response

Moderators: Dr. Mauro Belli (Ist. Sup. San.) and Dr. Fumio Suzuki (Hiroshima Univ.)

Brief Overview			Mauro Belli
Keynote	C0	GENETIC CONTROL OF RADIATION SENSITIVITY	Eric J. Hall
	C5	NITRIC OXIDE-MEDIATED BIFUNCTIONAL BYSTANDER EFFECT INDUCED BY HEAVY-ION RADIATION IN HSG CELLS	Chunlin Shao
	C7	CYCLIN-DEPENDENT-KINASE INHIBITOR EXPRESSION IN IRRADIATED DIFFERENTIATING HUMAN LENS CELLS IN VITRO	Eleanor A. Blakely
	C11	DENSELY LOCATED DNA DAMAGE CAUSED A DELAY IN CELL-CYCLE PROGRESSION IN HUMAN LYMPHOBLASTOID CELLS EXPOSED TO FE-ION	Sachiko Goto
	C6	INDUCTION OF RADIORESISTANCE TO ACCELERATED CARBON-ION BEAMS BY A NITRIC OXIDE-MEDIATED BYSTANDER EFFECT IN HUMAN GLIOBLASTOMA	Takeo Ohnishi Hideki Matsumoto
	C19	HYPERGRAVITY MODIFIED THE SIGNAL OF IONIZING RADIATION THROUGH p53	Kumio Okaichi
Brief Summary			Fumio Suzuki

March 14 (Thu) 13:30-15:45

### Roundtable Discussion-7

#### Space Radiation Biology (3): Gene Stability

Moderators: Dr. Amy Kronenberg (LBL) and Dr. Fumio Yatagai (RIKEN)

Brief Overview			Fumio Yatagai
Keynote	G0	BIOPHYSICAL ANALYSIS OF RISK BY LOW ION FLUENCES	Jürgen Kiefer
	G19	RADIATION MODULATED GENE EXPRESSION IN THE NEMATODE C.ELEGANS	Gregory Nelson
	G15	REPAIR OF DNA DOUBLE STRAND BREAKS IN HUMAN CELLS INDUCED BY RESTRICTION ENZYME I-SCEI	Masamitsu Homma
	G6	ANALYSIS OF LOW DOSE RATE EFFECT OF RADIATION AND THE SYNERGISM WITH HIGH GRAVITY BY A NEW MUTATION ASSAY SYSTEM	Kenshi Komatsu
	G11	HEAVY-ION INDUCED ISOCHROMATID BREAKS AND ITS INFLUENCE ON G2 REPAIR KINETICS	Tetsuya Kawata
	G12	EVALUATION OF RADIATION RISK BY THE USE OF CHROMOSOME ABERRATIONS	Sylvia Ritter
	G23	RADIOADAPTIVE RESPONSE FOR PROTECTION AGAINST RADIATION-INDUCED TERATOGENESIS AND APOPTOSIS IN MOUSE SPLEEN AND THYMUS CELLS	Ryuji Okazaki
	G21	IMPACT OF THE P53 STATUS ON THE EFFECT OF REACTOR NEUTRON BEAM IRRADIATION ON INTRATUMOR TOTAL AND QUIESCENT CELL POPULATIONS	Shin-ichiro Masunaga
	G27	PROTON RADIATION-INDUCED MUTATIONS IN LACZ TRANSGENIC MICE	Polly Chang
Brief Summary			Amy Kronenberg

March 14 (Thu) 16:00-17:00

**Roundtable Discussion-8**

**Space Radiation Biology (4): Plants**

Moderators: Dr. Yeqing Sun (Harbin Technology) and Dr. Otsura Niwa (Kyoto Univ.)

Brief Overview		Yeqing Sun
P1	EFFECTS OF HIGH-ENERGY CARBON ION IRRADIATION ON NEGATIVE GRAVITAXIS OF EUGLENA GRACILIS Z	Tetsuya Sakashita
P2	MUTAGENIC CHARACTERISTIC OF RICE SEEDS INDUCED BY SPACE ENVIRONMENT	Yeqing Sun
P7	EFFECTIVE MUTATION METHOD FOR PLANTS USING HEAVY-ION BEAMS	Tomoko Abe
Brief Summary		Otsura Niwa

March 15 (Fri) 8:50-10:10

**Roundtable Discussion 9**

**Medicine: Biological Protection**

Moderators: Dr. Thomas Seed (AFRRI) and Dr. Koichi Ando (NIRS)

Brief Overview		Koichi Ando	
Keynote	M0	DIETARY RETINYL ACETATE EFFECTS ON GENE EXPRESSION AND CANCER INHIBITION IN RAT SKIN	Fredric J. Burns
	M8	PREVENTIVE EFFECTS OF RUNNING EXERCISE ON BONE FRAGILITY OF HEAVY ION IRRADIATED RATS	Satoshi Fukuda
	M12	COMPARISON OF BIOLOGICALLY BASED MULTISTAGE MODELS FOR ANALYSIS OF LUNG CANCER INCIDENCE ASSOCIATED WITH LOW DOSE EXPOSURE TO IONIZING RADIATION IN THE NATIONAL DOSE REGISTRY OF CANADA COHORT	Stanley B. Curtis - for William Hazelton
	M7	WATER SOLUBLE VITAMIN E DERIVATIVE AS A RADIOPROTECTOR	Tsutomu Kagiya
	M15	BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY FOR MALIGNANT TUMORS IN KYOTO UNIVERSITY	Koichi Ando for Koji Ono
Brief Summary		Thomas Seed	

March 15 (Fri) 10:40-12:00

**Roundtable Discussion-10**

**Scientific Experiments in Space**

Moderators: Dr. Gregory Nelson (Loma Linda Univ.) and Dr. Tamotsu Nakano (NASDA)

Brief Overview		Tamotsu Nakano	
Keynote		Shunji Nagaoka	
	F7	REQUIREMENTS FOR BIOSPECIMEN EXPOSURE FACILITY ON JAPANESE EXPERIMENT MODULE (JEM)	Muneo Takaoki
	F6	AQUATIC ANIMAL EXPERIMENT FACILITY FOR SPACE UTILIZATION RESEARCH	Satoko Uchida
	F11	DETECTION OF DNA DAMAGE INDUCED BY SPACE RADIATION IN MIR AND SPACE SHUTTLE	Ken Ohnishi
	F9	RADIATION MICROBIOLOGY IN SPACE ENVIRONMENT CONDUCTED USING SPACE SHUTTLE AND SPACE STATION MIR	Kazuki Harada
	F18	GENETIC CHANGES INDUCED IN HUMAN CELLS IN SPACE SHUTTLE EXPERIMENT(STS-95)	Kanji Ishizaki
Brief Summary		Gregory Nelson	

## A2. 宇宙放射線被ばく防護体系検討委員会 規程

平成13年4月1日  
13規程第80号

### (設置目的)

第1条 航空機搭乗及び有人宇宙活動の放射線安全面での支援につながる調査研究を推進し、宇宙放射線被ばくにかかる防護体系の構築に資するため、宇宙放射線被ばく防護体系検討委員会（以下「委員会」という。）を置く。

### (審議事項)

第2条 委員会は、次の事項について調査審議する。

- (1) 宇宙放射線被ばく防護体系に関する基本方針の検討及び提言に関すること。
- (2) 宇宙放射線の外部被ばく線量評価に関すること。
- (3) その他宇宙放射線被ばくの防護体系構築に必要な事項に関すること。

### (組織)

第3条 委員会は、理事長が指名もしくは依嘱する委員長及び委員をもって組織する。

### (委員会の開催)

第4条 委員会は、委員長が召集する。

2. 委員長及び委員の過半数の出席が必要であると認められる時は、委員を召集し、委員会を開催することが出来る。
3. 委員会は、その審議を行うため必要と認める者を出席させ、意見または説明を求めることができる。

### (専門委員)

第5条 委員長は、専門的事項について、調査審議を行うための専門委員を置くことができる。

2. 専門委員は、委員会の推薦により、委員長が指名もしくは依嘱する。

### (任期)

第6条 委員長及び委員の任期は、1ヶ年とする。ただし再任を妨げない。

### (報告)

第7条 委員長は、審議の内容について、理事長に報告するものとする。

### (庶務)

第8条 委員会の運営に関する庶務は、放射線安全研究センター宇宙放射線防護プロジェクトにおいて処理する。

### (雑則)

第9条 この規程に定めるもののほか、委員会の運営等に関し必要な事項は、委員長が委員会にはかつて定める。

附 則 (平成13年4月1日 13規程第80号)

この規定は平成13年4月1日から施行する。

宇宙放射線被ばく防護体系検討委員会  
平成13-14年度報告書

平成15年3月 刊行

編集 独立行政法人 放射線医学総合研究所  
放射線安全研究センター 宇宙放射線防護プロジェクト

〒263-8555

千葉県千葉市稲毛区穴川4丁目9番1号

電話 043-251-2111 (代表)

ホームページ <http://www.nirs.go.jp/>

メールアドレス [isrl@nirs.go.jp](mailto:isrl@nirs.go.jp)

印刷 株式会社 実業公報社

ISBN4-938987-20-1