

# 第 1 章

# 1

## 電中研の取り組み

## 第 1 章 電中研の取り組み 目次

原子力技術研究所 低線量放射線研究センター 副センター長 上席研究員 酒井 一夫  
原子力技術研究所 低線量放射線研究センター 主任研究員 星 裕子

1 - 1	低線量率放射線照射のために .....	9
1 - 2	連携研究体制の強化 .....	13
1 - 3	低線量放射線研究センターの設置 .....	15



酒井 一夫（1999年入所）  
高線量放射線、温熱などによるストレス蛋白、DNA 損傷についての知見を活かし、低線量率放射線による生体影響研究を精力的にプロモートしている。低線量率放射線に対して生物が巧妙に応答する事例を「線量・線量率マップ」で目に見える形で示すことを提唱している。



星 裕子（1993年入所）  
低線量放射線の生物影響解明のために酵母や細胞といったレベルでの放射線感受性についての研究を経て、現在はマウスを用いて発がん抑制に関わる低線量率放射線の影響解明実験に従事している。様々な分野の方との交流を通して研究の成果を分かり易く伝えることの重要性を再認識中である。

## 1-1 低線量率放射線照射のために

低線量の放射線による生物影響に着目してから最初の10年は、主にX線を線源としたいわゆる高線量率・低線量が用いられてきた。このことにより、それまで知られていた高線量放射線によって引き起こされる生体応答とは異なるユニークな生体の応答が低線量放射線により起こることが数々発表されてきた。これによって、興味はさらに、線量率の低い、低線量率・低線量での応答に広がってきた。私たちヒトを含む生物は、意識せずとも自然放射線と呼ばれる少量の放射線をいつでも受けている。この放射線は、年間平均(世界)で2.4 mSvという線量になる。これは、いうまでもなく極低線量率の放射線である。私たちヒトが放射線を受けるのは、事故などのように一度に高線量率で受けるもの、X線診断に代表されるそれよりも低い線量・低い線量率の医療によるもの、そしてこの自然放射線によるものである。私たちが放射線による影響を考えると、自然放射線に近いもののそれよりは高い線量率での被ばくにより何が起きているのかを知ることが、通常生活している私たちへの影響を探る方法であると考えた。

### 1-1-1 低線量率放射線長期照射施設

これまでの低線量放射線生物影響研究はX線を線源とした高線量率・低線量が主体であった。低線量率放射線の影響を見るには、低線量率で照射し、なおかつある程度の期間照射し続ける場が必要である。そのため、低線量放射線研究センターでは、実験動物等に、長期にわたって低線量率の放射線を照射することのできる低線量率放射線長期照射室を構築した(図1-1-1)<sup>1)</sup>。低線量率放射線照射施設は、この低線量率放射線長期照射室のほかに、X線照射室、マウス飼育室を備えている(図1-1-2)。

低線量率放射線長期照射室は、図1-1-1に示すように9 m × 12 m (高さ5 m)の広さで遮蔽のために60 cmの厚さのコンクリートに囲まれている。37GBqと370GBqのCs-137を線源として備え、どちらか一方を用いる(現在は370GBqを使用中)。この線源からの距離によって線量率を変化させて使用することを想定している。

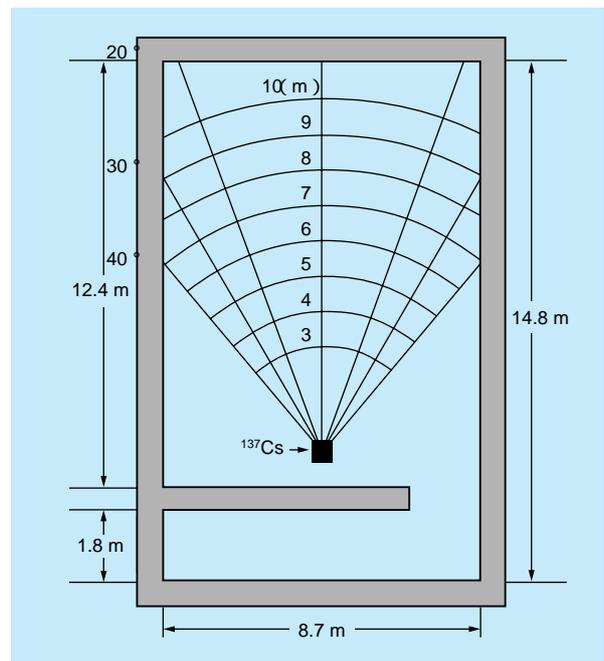


図1-1-1 照射室内平面図

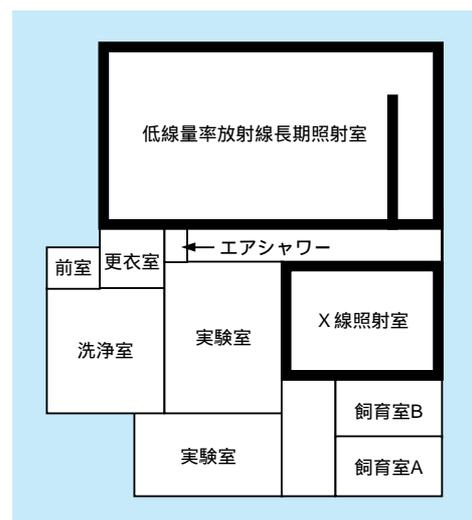


図1-1-2 低線量率放射線照射施設平面図

さらに、同一の線源を使用して、線量率の異なる実験を平行して行うために、照射野は線源を中心とした扇状にマウスの飼育棚を設置するような配置を取っている。線源格納容器の照射口は横方向に角度がついているので、左右40°までが照射野となっている。

この照射室の特徴は、前述のように線源からの距離に

よって線量率を変えることができる点にある。このこと  
 によって、0.35・3.0 mGy/hrの線量率域を同時に使用し  
 ている。もうひとつの特徴は、飼育室自体が低線量率の  
 放射線を照射し続けることのできる照射室になってい  
 ることにある。照射室をかねていることから、通常のマウ  
 ス飼育に用いられるような金属性飼育棚ではなく、遮蔽  
 と散乱を極力抑えるために木材とプラスチックを主材料  
 とした飼育棚を用いている。そのため、照射飼育室内の  
 線量分布のばらつきは約10%以内におさえられ、均一  
 性が保たれている（図1-1-3）。また、マウス以外に細胞  
 を被照射体として用いるために照射野にはプラスチッ  
 クを主材料にしたインキュベータを設置している（図  
 1-1-4）。これにより、細胞も長期にわたって低線量率放  
 射線を当て続けながら培養することができる。

また、X線照射室に設置されている照射装置は最大  
 320kVでのX線発生が可能であり、これまで用いてい  
 た150kVのもの（別実験室に設置）とあわせることに



図1-1-5 X線照射装置

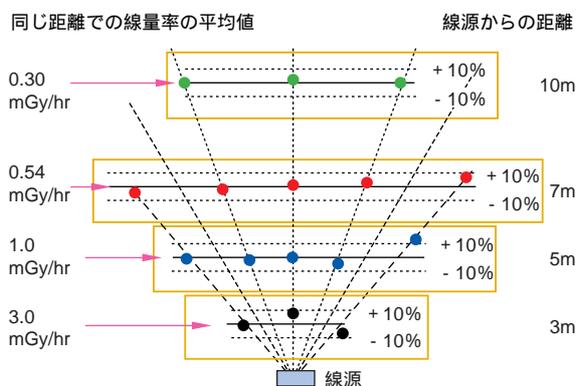


図1-1-3 照射野内の線量率のばらつき



図1-1-4 照射野内のインキュベータとマウス飼育棚

より、用いることのできる線量率域がさらに広がった  
 （図1-1-5）。これにより、大線量の放射線を当てる場合  
 にかかっていた時間を短縮することも可能となった。

これらの施設の中では、照射室、飼育室あわせて、最  
 大1800匹程度のマウスを飼育することが可能となっ  
 ている。

### 1-1-2 照射室内の線量評価

放射線による生体影響を調べるときに、重要なこと  
 のひとつに線量評価がある。低線量率放射線の影響を明ら  
 かにすることを目的とする研究ではこれまで行われてき  
 た放射線影響研究に比較して、照射期間が長くなってい  
 る。そのため、動物飼育に関わる器具などによる放射線  
 の吸収・遮蔽・反射、あるいは、実験動物自体の姿勢や  
 位置の変化によって動物が受ける放射線量が変動するこ  
 とも考えられる。そのため、実験動物の体内に線量計を  
 埋め込み、動物の動きに伴う体内での吸収線量を実測す  
 る方法が有効であると判断した。従来、動物体内の吸収  
 線量の測定には、大きさの制約から熱ルミネセンス線  
 量計（TLD）が用いられることが多かった<sup>(2-5)</sup>。しか  
 しながら、熱ルミネセンスという性質上、フェイディ

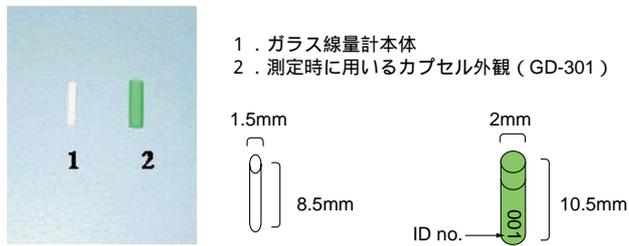


図1-1-6 ガラス線量計

ングが大きく、長期の測定には向かないといった欠点があった。これに比べ、改良された銀リン酸塩ガラスからなるガラス線量計（図1-1-6）にはこのフェイディングがなく、ばらつきも小さいとの報告がある<sup>(6・8)</sup>。その測定原理は、吸収した放射線のエネルギー量に応じて蛍光中心が形成され、紫外線励起によるガラスからの蛍光量が変動する。その蛍光量を測ることにより吸収放射線量を定量するものである。我々は、このガラス線量計で低線量率放射線長期照射施設およびX線照射装置によるマウス、細胞の照射実験における吸収線量を測定評価した。

リン酸蛍光ガラス線量計（旭テクノグラス）のうち、小型のもの（GD・301 type）を用いた（図1-1-6）。また、X線測定には低エネルギー線源用としてエネルギー補償Snフィルタ（3 mm × 1.5 mm）を装着した。麻酔下で清浄な線量計をマウス腹腔内に埋め込み、照射の後線量計を摘出した。

まず、線源から10 mの位置に設置した飼育棚で、ひとつのケージにつき5匹ずつ飼育した。24.5、46.5時間照射を行い、マウス腹腔内から取り出したガラス線量計より吸収線量を読取った。その結果、図1-1-7に示すとおりガラス線量計においては同条件のマウス5匹間の吸収線量にばらつきが小さいことが示された。また、照射期間を変えて線量測定を行った<sup>(9)</sup>。すなわち、ガラス線量計を2本ずつマウス腹腔内に埋め込み、1ケージに5匹飼育し、それぞれ1、3、8、24時間、あるいは1、2、7、30日照射した時点で1匹ずつ非照射野に移し、24時間、あるいは30日後にすべての線量計をマウスから回収し、線量の測定を行った。この結果、短期照射（24時間、図1-1-8a）において照射時間と吸収線量の間には完全な比例関係が認められた。また、2本の線量計はほぼ同じ線量を示し、ここでもばらつきの小さが示された。長期照射（30日間、図1-1-8b）におい

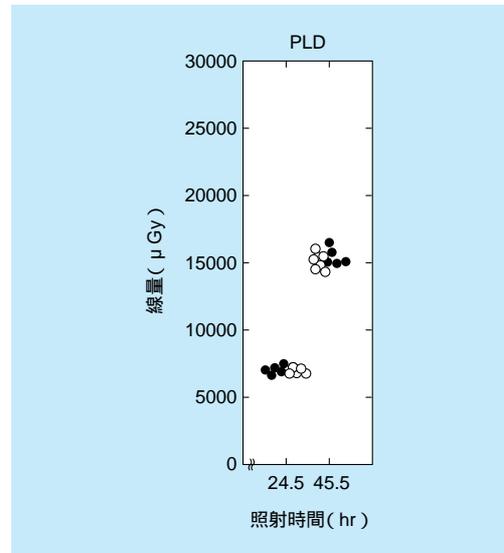


図1-1-7 ガラス線量計により測定されたマウス体内における吸収線量のばらつき、は2回の実験での各マウスにおける線量を示す

ても、ほぼ直線関係が認められた。これにより、ガラス線量計による線量測定においてはフェイディングが少なく、長期の線量測定にも使用可能であることが示された。

実際の照射野の線量評価は、このガラス線量計を用いて行った。

電離箱による照射線量は、長期照射設備完成時（1998.11）に室内に何も無い状態で、照射野の数箇所（床上1.5 m）について測定された。ガラス線量計での測定は、照射実験が開始された後、空間線量として、線量計をマウス飼育棚の亚克力戸（床上1.51 m）の外側に設置し、測定した。その結果、これらの測定による値は測定時からの減衰を換算するとよく一致した<sup>(1)</sup>。このときの低線量率放射線長期照射室の線源から3、5、7、10 mの位置におけるガラス線量計により測定された吸収線量率は3.5、1.2、0.66、0.35 mGy/hrであった。

急性の低線量照射で用いるX線照射装置 MBR-320R（図1-1-5）でのマウス体内における吸収線量を測定した。本X線照射装置では被照射体位置での照射線量を設定し照射を行う。このとき、照射時間が表示されるので、ガラス線量計で測定された線量とこの照射時間より線量率を算出した。この結果、ガンマ線照射と同様に照射線量と比較すると、マウス腹腔内での吸収線量は71 - 79%になることが明らかとなった。

低線量率放射線照射室には、細胞に照射しながら培養

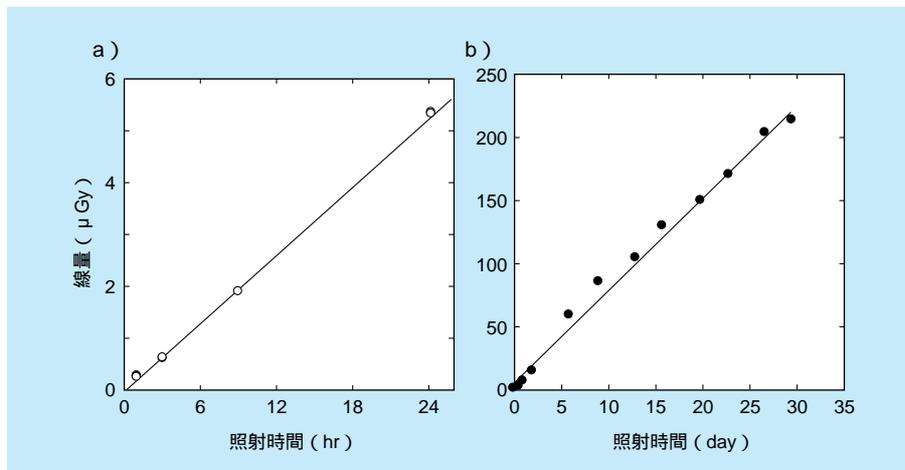


図1-1-8 照射時間とガラス線量計により測定されたマウス体内における吸収線量の関係

- a) 24時間まで(短期)の照射におけるマウス体内の吸収線量。各測定ポイントは2匹のマウスの体内にそれぞれ埋め込んだ線量を示すが、すべてのポイントで二つの値はほぼ同値を示しマークが重なっている。
- b) 30日間(長期)の照射におけるマウス体内の吸収線量

するためにCO<sub>2</sub>インキュベータを線源から5 mの位置に設置されている(図1-1-4)。このインキュベータ内に25 cm<sup>2</sup>の培養フラスコを並べてフラスコ内での吸収線量を測定した。実験の際は、インキュベータの上段(床上80 cm)と、下段(床上57 cm)を使用した。その結果、インキュベータ内における線量率は0.80・1.18 mGy/hrであり、ほぼ均一な線量率であることを確認した。

低線量放射線、あるいは低線量率放射線の生物影響研究において要求されている線量・線量率の範囲は広いが、これまで報告された線量・線量率の範囲は限られてきた。

当センターに設置されている各種の照射装置はこれまでカバーしきれなかった範囲をカバーしうることが線量測定の結果より明らかとなり、低線量率域での幅広い線量率での照射が可能であることが示された。さらにX線照射装置を用いることで約1.5 Gy/min (90 Gy/hr)の照射も可能である。また、細胞への照射についてはこれまで不可能であった継代しながらの照射(今回実験に用いたインキュベータでは1 mGy/hr程度の線量率)が可能となり、放射線生物研究の新しい展開が期待されている。

## 1 - 2 連携研究体制の強化

電力中央研究所では、低線量放射線の影響研究に取り組み始めた初期の段階から、外部研究機関との連携体制を取ってきた。1993年には、本格的なプロジェクト研究を開始し、共同研究のプロモートと研究のコーディネートを進める体制を確立した（表1-2-1）。これまでに連携を行ってきた機関は30を超える（表1-2-2）。この中には、カナダのオタワ大学や、チョークリバー研究所など国外の研究機関も含まれている。

連携研究は、多岐にわたる低線量放射線研究の分野をカバーする上で重要な位置を占め、その成果は1999年の第11回国際放射線研究会議（ダブリン）におけるサテライトミーティングの開催、2003年第12回同会議（プリズベン）におけるシンポジウムの開催、日本放射線影響学会における低線量ワークショップの開催など、低線量研究のネットワークの拡充にも貢献してきた。

表1-2-1 1993年に開始された低線量放射線の生物影響に関する連携研究プロジェクト

<b>1. 発がん抑制効果の検証</b>		
(1) 細胞がん化とその抑制	長崎大・薬	渡邊教授
(2) 抗がん効果と免疫活性	東北大・医	坂本教授
(3) がん抑制遺伝子の活性	奈良県立医大	大西教授
<b>2. 老化抑制効果の検証</b>		
(1) 代謝酵素活性と関連遺伝子	大阪市立大学・医	井上教授
(2) 活性酸素病態軽減効果	倉敷成人病センター	内海所長
(3) 大脳細胞の老化と関連物質	愛媛大・医	植田教授
<b>3. 遺伝子損傷修復機構活性の検証</b>		
(1) DNAの損傷とその修復	京都教育大	生島教授
(2) 体細胞の突然変異	東北大・医	小野教授
<b>4. 生体防御機構活性の検証</b>		
(1) 化学的生体防御機構の活性化	横浜市立大・医短	松原教授
(2) 細胞の自爆死	東京歯科大	木崎教授
(3) 細胞交代機能活性と神経系	東邦大・医	山田教授
(4) 免疫機能活性とその機構	産業医大	法村教授
(5) 放射線抵抗性の獲得	大阪府立大・先端研	米澤助教授
(6) 腸組織の活性化現象	東大・RIセンター	井尻助教授
(7) 老化促進マウスの応答	長崎大・医	奥村教授
(8) 生体膜の代謝調整	岡山大・医	森教授
<b>5. 疫学調査</b>		
(1) 長崎被災者の疫学調査	長崎大・医	奥村教授

表1-2-2 その後の低線量放射線生物影響研究連携体制（所属および肩書きは連携時のもの）

分子・細胞レベルの解析	
放射線によって誘発される長寿命ラジカルに関する研究	名古屋大・工 宮崎助教授
低線量放射線に対する細胞の応答と細胞内情報伝達に関する研究	京都大・放射線研究センター 佐々木教授
p53を介した低線量放射線に対する細胞応答と影響発現の制御	奈良県立医科大 大西教授
低線量放射線の連続照射による免疫疾患の改善効果	東京理科大・薬 小島教授
低線量放射線によるEGF受容体の活性化の機構解明	東京大 疾患生命工学研究センター 細井助教授
低線量による細胞膜からの細胞内情報伝達系の活性化と放射線応答における役割	京都大・原子炉実験所 渡邊教授
放射線によるT細胞白血病誘発に関する感受性の解析	英国放射線防護庁 Bouffler部長
個体レベルでの解析	
マウスにおける突然変異誘発を指標とした線量率効果	産業医科大・医 法村教授
低線量放射線による放射線抵抗性の獲得の機構解明	大阪府立大 先端科学イノベーションセンター 児玉教授 大阪府立大 米澤教授
低線量・低線量率放射線照射による型糖尿病改善効果の機構解明と加齢に及ぼす影響評価	産業創造研究所 川上部長
低線量放射線の健康リスクに関する実験研究	産業創造研究所 川上部長
低線量放射線に対するダンゴムシの行動・ショウジョウバエの発生、分化に関する研究	東邦大・医 宮地助手
微量放射線照射の中樞神経系への影響	東邦大・医 宮地助手
低線量放射線によるp53変異マウスにおける発がんおよび突然変異の抑制	チョークリバー研究所 Mitchel主任研究員
疫学調査	
原爆被爆者の発がん・がん死亡統計におけるしきい値	長崎大・医 三根助教授 長崎大・医 奥村教授
三朝ラドン温泉適応症の機構に関する基礎検討	岡山大・医 山岡教授
ラドン温泉熱気浴時の線量推定	放射線医学総合研究所 山田グループリーダー
高自然放射線地域住民の疫学調査	体質研究会 菅原理事長
データベース構築	
低線量・低線量率放射線リスク評価のための動物発がんデータ集約データベースの構築	オタワ大学 Duport教授

# 1 - 3 低線量放射線研究センターの設置

電力中央研究所では、それまでの低線量放射線影響研究の成果を踏まえ、その重要性を再認識するとともに、放射線と人類との関わりがますます重要になることを見据えて、2000年10月に低線量放射線研究センターを設立した。

低線量放射線研究センターは研究部門と情報発信・交流部門とからなる。研究部門では、(1) 低線量放射線の影響の正しい理解、(2) 放射線防護基準の見直し、および(3) 医療への適用可能性の探索、を研究の柱(図1-3-1)に設定し、低線量率放射線長期照射設備を駆使して、動物個体、組織・細胞および分子・遺伝子のレベルで独自の研究を進めている。また、外部研究機関との連携ネットワークの拠点として、低線量放射線の生物作用の正確な理解とその応用につながる情報の収集に努めている(図1-3-2)。

研究部門に加え、情報発信・交流部門を併設したことがLDRCの大きな特徴のひとつである。情報発信・交

流部門では研究の成果および関連情報を、キャラバン活動、ホームページ、データベースなどを駆使して発信し、専門家および一般への情報発信活動を展開している(3-3参照)。

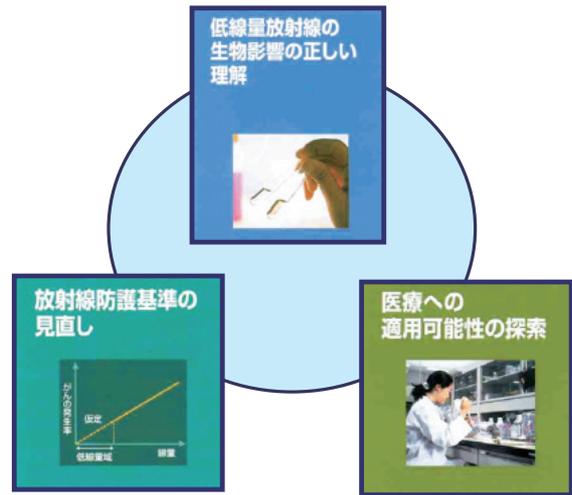


図1-3-1 低線量放射線研究センターの研究目標

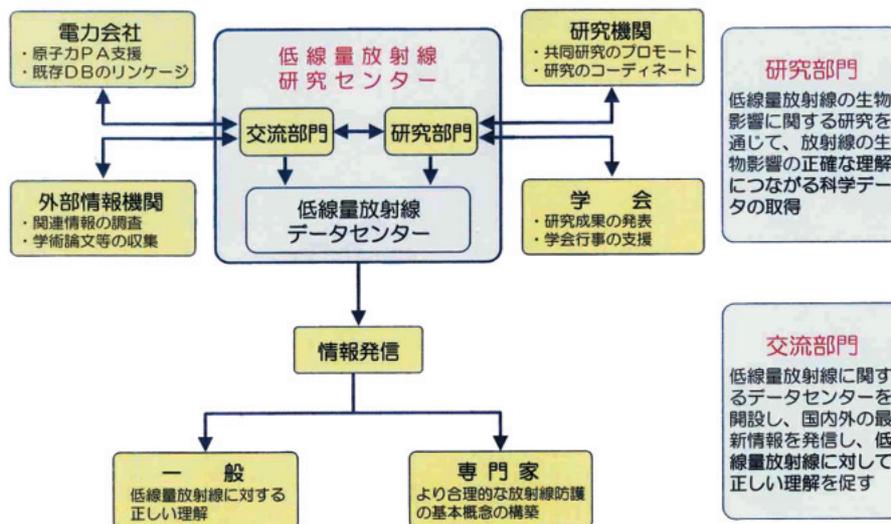


図1-3-2 低線量放射線研究センターの機能とその展開