

「持続可能なエネルギー開発」

日本原子力学会は、低炭素エネルギー源による多角的なエネルギー確保への取り組みが求められている今こそ、持続可能なエネルギー確保の観点から太陽光、風力、バイオマス等の再生可能エネルギーと並び発電に伴って温室効果ガスを出さず、以下に示す技術競争力と経済競争力を有する原子力の利用拡大に向けた戦略的取り組みを強化すべきである。

1. 原子力発電は地球温暖化対策に最も有効な選択肢の一つである

京都議定書の 2012 年までの目標達成だけでなく、昨年の洞爺湖サミット後閣議決定された、2020 年を目途に再生可能なエネルギーや原子力発電等の「ゼロ・エミッション電源」の割合を 50%以上とすることを達成するためには、大規模電源の中で必要な設備製造や施設建設時を含め温室効果ガス排出量の極めて少ない原子力発電の利用拡大が最も有効な選択肢の一つである。(図 1 参照)

2. 原子力発電の利用拡大はエネルギーセキュリティを高める

わが国のエネルギー自給率は僅か 4%しかない。原子力を国産エネルギーとしても 20%しかなく、改善が急務と言われている食料自給率 40%のさらに半分である。既に激化している地球規模での資源・エネルギー争奪競争の中でエネルギー供給の安定性を高めるには、原子力発電の利用拡大が最も効果的である。(図 2 参照)

3. 軽水炉の使用済燃料にはリサイクル可能な資源が豊富に含まれている

現在稼働中の軽水炉の使用済燃料にはリサイクル利用可能な資源が豊富に含まれている。その代表的なものはウラン(U)とプルトニウム(Pu)であり、それらを取り出す工程が再処理である。使用済燃料にはこの他にもリサイクル利用可能な物質が含まれており、それらを分離、再利用することにより、放射性廃棄物の放射能も減少させることができる。日本原子力研究開発機構を中心とした官民の研究機関でその技術開発を進めている。

4. 高速増殖炉の実用化によってウランの可採年数は千年オーダーとなる

軽水炉の使用済燃料を使い捨てにすると U 資源の可採年数は現状のままでは約 100 年しかなく、持続可能とは言えない。高速増殖炉では新しく燃料とすることができる Pu が発電に使われる量以上に生成するため、Pu 生成の元にもなる U 資源を節約することができる。その結果 U 資源の可採年数を千年オーダーまで増加させ、エネルギー供給の安定性を飛躍的に高めることができる。したがって、日本原子力研究開発機構を中心とした官民の研究機関で進められている高速増殖炉の技術開発は、資源小国のわが国にとって最重要課題の一つである。

5. 放射性廃棄物を安全に処分することによって真に持続可能となる

原子力発電所の運転及び使用済燃料の再処理等から発生する放射性廃棄物の放射能が人体に有害でなくなるまで安全に市民の生活圏から隔離することは原子力を利用する上での大前提であり、それが実現することによって原子力は真に持続可能なエネルギーとなる。原子力発電所の運転に伴って発生する放射性廃棄物のうち、低レベル放射性廃棄物の一部についてはそれが既に実現している。使用済燃料の再処理によって発生する高レベル放射性廃棄物等についても処分技術は既に開発され、海外では既に処分場の建設準備が始められている国もある。高レベル放射性廃棄物については原子力発電環境整備機構が処分場建設のための立地活動を推進している。

6. 原子力はわが国が国際的リーダーシップをとれる重要かつ貴重な分野である

原子力利用の大前提は安全性と核不拡散体制の確保である。わが国の原子力技術の安全性と品質の高さは国際的に最高水準にあり、世界的に高まっている原子力発電所建設及び次世代炉開発の中心的役割を日本の技術が担っている。また、わが国は核不拡散上重要な保障措置に関しても最先端技術を有している。原子力の安全性と核不拡散問題はわが国が国際的なリーダーシップをとれる重要かつ貴重な分野である。

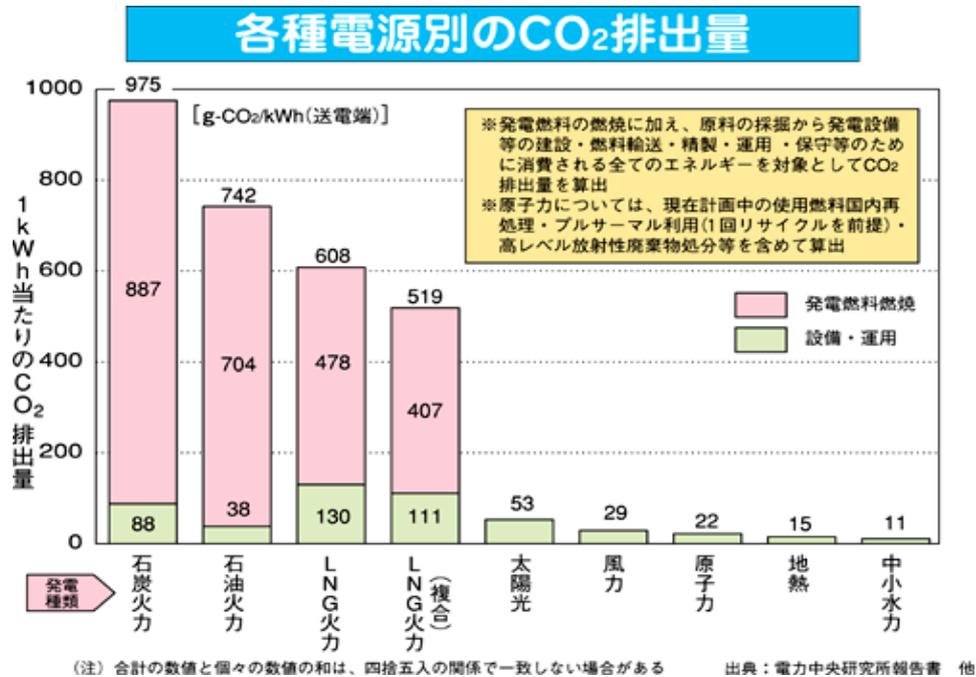
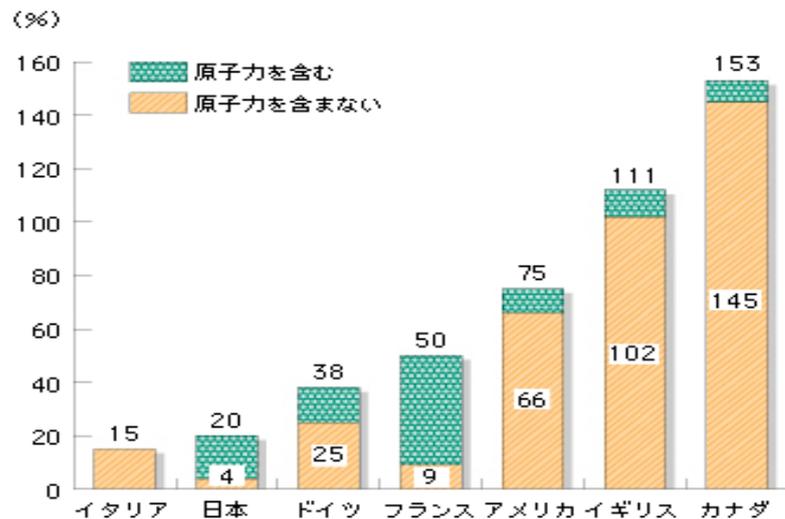


図1 各種電源別のCO₂発生量



資料：IEA「Energy Balances of OECD Countries 2000-2001」

(注) 電力はその輸出入量を一次エネルギーとして計上している。

図2 主要国のエネルギー自給率

平成 21 年 1 月作成

日本原子力学会

社会・環境部会

エネルギーにおける外部性と原子力

エネルギーの外部性 (Externalities) とは、そのエネルギーを生産する過程で生ずる社会的影響のうち、当該エネルギーの市場価格に反映されない影響のことを指す。典型的な例は公害問題である。わが国でもイオウ酸化物 (SO_x)、窒素酸化物 (NO_x) の除去装置をつけずに化石燃料の燃焼ガスが大気中に放出されていた時代には、放出された SO_x および NO_x によって公害問題が発生し、自然環境の破壊や周辺住民の健康被害、あるいはそのエネルギーの生産活動とは直接関係のない第三者の私有財に対して悪影響を及ぼしていた。これがエネルギーの外部性の一例であり、このように負の影響が生ずるものは外部不経済、或いは「外部コスト」とも呼ばれている。(正の影響が生じる外部性もあり、外部経済と呼ばれるが、以下ではエネルギーに関連して主に論じられる負の外部性、すなわち外部不経済、外部コストについて述べる) その後 SO_x、NO_x の除去装置をつけることによって公害防止が図られることになるが、これら除去装置の設置費用等をエネルギーの生産価格に組み入れることによって燃焼ガスによる負の影響を市場価格に反映したことになる。これを外部性の内部化と呼ぶ。

自由主義経済では、経済活動の個々の段階、例えば、生産、流通、使用等で派生する種々の負の環境影響 (廃棄物、有害物質の放出等) を緩和するための費用を市場メカニズムに取り込んでこなかったケースがほとんどである。

外部性の概念自体が生まれたのは 1920 年代にまで遡るが、産業活動において具体的に注目されたのは、環境影響 (公害) 問題が顕在化した 1970 年代である。1974 年には経済協力開発機構 (OECD) から、「発生者負担の原則 (Polluter Pays Principle)」が表明されている。外部性を発電の領域に適用することの検討が始められたのは、1980 年代の米国においてである。米国では、電力売買の市場化の検討が進められる中で、電力料金を決める立場の州が指導して、電力会社において外部性評価の検討が進められた。

一方、欧州においても欧州連合 (EU) 圏形成、拡大の流れの中で、電力の競争市場が形成されることになった場合、外部性がどの程度の規模になるかは関心事の一つであった。1990 年代初頭には、ExternE (Externalities of Energy : エネルギーの外部性) と呼ばれる、欧州共同体 (EC) と米国エネルギー省 (USDOE) との共同研究が開始された。国際的に発電システムの外部性を体系的に評価した点で、特筆すべきプロジェクトである。1997 年までに発表された成果においても、いくつかの技術的課題が指摘されており、その後も適宜更新が行われ、2005 年には最新の手法が報告された。

日本では、2000 年 3 月から電力の一部小売自由化が実施され、米国や欧州諸国のように電源開発において各種発電システムの外部性が全体経済の中で注目されてきている。さらに外部性評価の重要性を認識させるものとして、地球温暖化対策としての適切なエネルギーシステムの選択が挙げられる。地球温暖化に対する有効な具体策を求める観点から、発電システムの外部性は、ローカル、グローバルを問わずエネルギー問題を検討する上で重要な要素の一つとなっている。

近年のグローバルな外部性評価では、個々の汚染物質による物理的影響を推定してボトムアップ式に被害を積み上げていく方法が採られている。この様な手法は、一般的には次の 4 つのステップで構成される。

- ① 評価対象の特定並びに評価対象外部コスト要因の選定
- ② 環境質 (例えば、大気、水、土壌等の汚染状況等を示すもの) の変化の推定 (汚染物質放出量、環境中の移動及び暴露量の把握)
- ③ 環境、健康等への物理的影響の推定

④ 推定される物理的影響の貨幣価値への換算

外部性を評価したものの1例として ExternE の評価結果を以下に示す。

これはそれぞれの発電方式による温暖化効果、公衆の健康影響、従業員の健康影響、物理的なダメージ等の外部性を経済的に評価し、kWh あたりのコスト(EUR-cent、1/100 ユーロ単位) (1 kW×1 時間あたりのコスト) に換算したものである。

表 発電方式毎の外部性評価例 (Extern E の評価結果) (EUR-cent/ kWh)

	石炭 火力	石油 火力	天然ガ ス火力	原子力	バイオ マス	水力	太陽光	風力
オーストリア			1-3		2-3	0.1		
ベルギー	4-15		1-2	0.5				
ドイツ	3-6	5-8	1-2	0.2	3		0.6	0.05
デンマーク	4-7		2-3		1			0.1
スペイン	5-8		1-2		3-5*			0.2
フィンランド	2-4				1			
フランス	7-10	8-11	2-4	0.3	1	1		
ギリシャ	5-8	3-5	1		0-0.8	1		0.25
アイルランド	6-8							
イタリア		3-6	2-3			0.3		
オランダ	3-4		1-2	0.7	0.5			
ノルウェー			1-2		0.2	0.2		0-0.25
ポルトガル	4-7		1-2		1-2	0.03		
スウェーデン	2-4				0.3	0-0.7		
イギリス	4-7	3-5	1-2	0.25	1			0.15
平均値	4-7	4-7	1-2	0.4	1.2-1.6	0.4-0.47	0.6	0.13-0.17
* 褐炭との混焼								

<http://www.externe.info/>

この評価結果によれば原子力の外部性は国によって 0.2(ドイツ)から 0.7(オランダ)(EUR-cent/kWh)と巾があるものの、他電源と比較すると風力に次いで少なくなっている。これは温暖化効果ガスの排出量が少ないことが大きな要因である。また、原子力の評価値は、国による違いが比較的小さいが、バイオマス、水力、あるいは風力は、国により景観や樹林の重要性評価などが異なるため、比較的大きな違いとなっている。

エネルギー源は、資源の供給量、安定性、価格など多様な要因の評価によって決定されるが、外部性も評価要因の一つとして重要性が増してきている。

以上

OECD : Organisation for Economic Co-Operation and Development

EU : European Union

EC : European Commission

USDOE : United States Department of Energy

参考文献

1. 伊東慶四郎,小西 哲之他「エネルギーの外部性と原子力」日本原子力学会,2006

高レベル放射性廃棄物の地層処分

2009年2月

日本原子力学会
バックエンド部会

日本原子力学会は、全ての放射性廃棄物が適切に処分されることが、わが国の原子力平和利用に欠かせない重要な課題であると確信している。なかでも、放射能の大半を含有する高レベル放射性廃棄物は地層処分によって超長期にわたって人間とその生活環境から隔離することが必要である。

高レベル放射性廃棄物の地層処分は 2000 年に実施主体の原子力発電環境整備機構（NUMO）が設立され 2002 年に文献調査地区の公募を開始したが、文献調査への応募を得てこれを着実に進めるまでには至っていない。地層処分が実現されない状態がいつまでも続いた場合、使用済燃料再処理工場の操業が中断し、ひいては原子力発電所の運転が中断を余儀なくされ、電気を使う国民の生活や産業活動に重大な影響を及ぼす可能性がある。

このため、日本原子力学会は、地層処分を実現するための迅速なアクションが取られるよう以下の通り支持、提言する。

1. 地層処分事業を推進するための取り組みの強化策¹について、国、NUMO、電気事業者が各々の役割を踏まえ、体系的、効率的かつ着実に持続的な実行がなされること。

放射性廃棄物小委員会報告書¹は強化策として、1.文献調査を進めるための強化アプローチ（国民全般への広報の拡充、地域広報の充実、現行の公募方式を基本とした上での国が前面に立った取組（申入れ）、2.地域振興構想の提示、3.国民理解に資する研究開発及び国際的連携の推進、4.国、NUMO、電気事業者による体制、機能の強化に取り組むこととしている。

2. 地層処分事業は、サイト選定から建設、操業、閉鎖、閉鎖後管理、事業廃止まで、ステークホルダー間の意見交換、安全レビュー、モニタリング等を行いながら数十年から数百年にわたり段階的に進めることから、当該分野の新たな知見も十分取り入れられるよう国、NUMO、電気事業者の適切な連携がとられること。
3. 地層処分の安全性を国民に説明するうえで、わが国の安全基準や指針が整っていることが大切であるので、原子力安全委員会や規制当局において、早期に整備されること。

4. 高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）固化設備において安定した品質のガラス固化体の製造が行われるよう、安定運転を早期に確立すること。（このステートメントが発出されるまでに問題が解決している場合は「安定した品質のガラス固化体の製造が継続して行われること。」とします。）
5. 放射性廃棄物処分を安全に行うために大学や研究機関は基礎基盤研究を着実に継続すること、また今後百年に亘る処分事業の実現に向けた研究開発には常に一定規模の資源を有する必要があることから、若手研究者の育成に力を入れること。

日本原子力学会は、これらの活動に対して、中立、公正な科学技術者集団としての立場から、全面的に支援する。

参考文献

1. 総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会放射性廃棄物小委員会、中間とりまとめ～最終処分事業を推進するための取組の強化策について～、平成 19 年 11 月。

低レベル放射線被ばく健康に与える影響

2016年12月

日本原子力学会

保健物理・環境科学部会

はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の事故により、放射線が人の健康に及ぼす影響を心配している人が多くいます。ここでは、低いレベルの放射線被ばく(放射線にさらされること)が人の健康に与える影響について、我が国も含めて世界の多くの国々が放射線安全規制に取入れている国際放射線防護委員会(ICRP)の勧告の考え方に基づいて解説します。

放射線の影響

放射線被ばくが人の健康に与える影響は大きく2つに分類することができます。それは、「確定的影響」と「確率的影響」です。

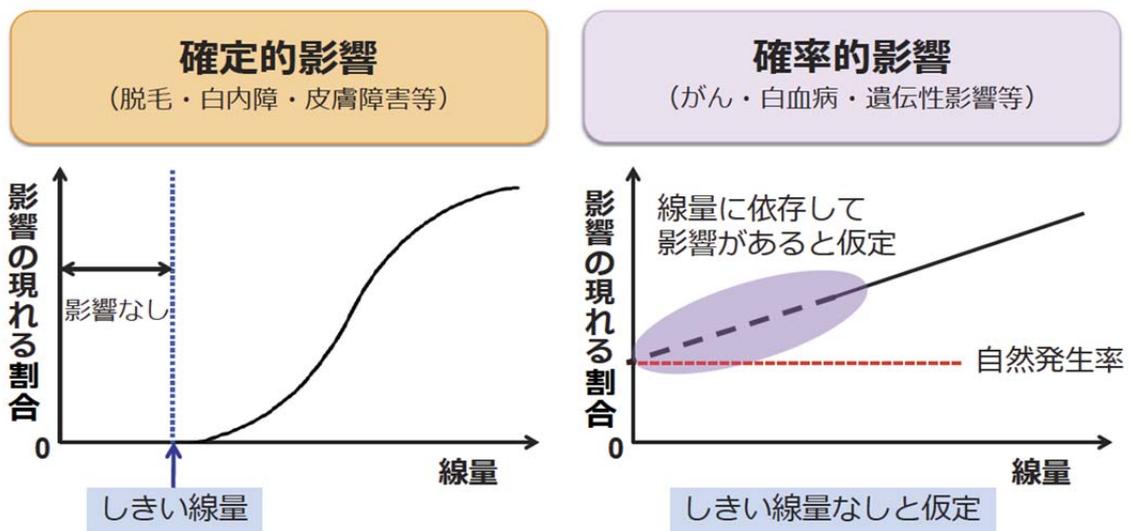


図1 確定的影響と確率的影響

出典：「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料 平成27年度版 ver. 2015001」

(<http://www.env.go.jp/chemi/rhm/h27kisoshiryo/attach/201606mat2-03-4.pdf>) から作成

放射線の確定的影響

前者の「確定的影響」は、図1の左側に示したように、ある放射線の量(以下、被ばく線量という)を超えて被ばくした時に発生する影響です。この「ある被ばく線量」とは、人の健康に与える影響が発生するしきい値(目安)となるため「しきい線量」と呼ばれます。確定的影響は、しきい線量を超える高い線量の放射線を一度に被ばくすると、有意に(1%以上¹⁾の割合で影響が発生し、被ばくの線量が大きくなればなるほど、発生割合が増加して影響が重くなります。確定的影響には、不妊、造血能力の低下(リンパ球の減少)、皮膚の障害、脱毛、白内障や、胃腸管、肺、腎臓や神経系の障害がありますが、それぞれのしきい線量は影響の種類によって異なることが明らかになっています²⁾。放射線の健康に与える影響の防護対策を国際的に主導しているICRPは、その最新の主勧告である2007年

勧告¹⁾において、これらの障害のうち最も低いしきい線量は、一度に放射線を受ける場合でおおよそ 100mGy (ミリグレイと読む、ガンマ線の被ばくではほぼ 100mSv に等しい) (注 1) と考えています。これは、放射線作業に従事する人のように、年間を通して被ばくしてトータルでこの放射線量を受ける場合でも同じと考えています¹⁾。また、胎児の被ばくについても、100mGy 未満の線量での被ばくでは奇形が発生するリスクはないと判断しています¹⁾。精神的遅滞 (精神的な発達の遅れ) については、出生前の最も細胞などが放射線に対して敏感な時期 (受胎後 8-15 週間) に被ばくした人に重い精神的遅滞が現れた原爆生存者のデータがあります。このデータから判断して、精神的遅滞の影響が現れるためのしきい線量は 300mGy であり、それ以下の線量では精神的遅滞のリスクは存在しないと考えています¹⁾。以上をまとめますと、100mGy 以下の線量では確定的影響は発生しないといえます。幸いにも、福島第一原子力発電所事故においては、一般の人に 100mGy 以上の高い線量での被ばくは認められませんでした²⁾。このことから、同事故で被ばくした一般の人に、確定的影響の心配はありません。

放射線の確率的影響

後者の「確率的影響」には、「がん (白血病を含む)」と被ばくした個人の子孫に生じる「遺伝的影響」があります。図 1 の右側に示したように、この確率的影響は、高い線量で被ばくした場合は、被ばくした線量とともにその発生する割合が大きくなる特徴があります。確率的影響 (がんや遺伝的影響) は、被ばくした全ての人に必ず発生するわけではないので、被ばくした多くの人のデータを集めて、その発生割合を評価する必要があります。この確率的影響の発生割合を調べるため、広島・長崎の約 12 万人の原爆被爆者のグループ、チェルノブイリ原子力発電所事故で被ばくした住民などのグループ、がん治療などの放射線医療で被ばくした患者のグループなどの追跡調査から得られた疫学データ (がんなどの発生に係る人体の健康に与える影響のデータ) が用いられています³⁻⁴⁾。これまで、主にかんが発症に関するデータが詳細に解析され、この結果をもとにして、人体の安全の目安となる放射線管理に関するいろいろな基準が整備されています。遺伝的影響については、原爆被爆者や放射線治療を受けたグループの子供たちにおいて、統計の上で自然に発生する場合との明らかな差は認められていません¹⁾。

低レベル放射線被ばくの健康に与える影響

低レベル放射線被ばくの人の健康に与える影響を考える場合、100mSv (注 2) 以下の線量では、確定的影響は発生しませんし、確率的影響のうち遺伝的影響については、さらに高い線量を受けた原爆被爆者のグループでもその有意な発生が認められていないため、がんによる影響だけが問題となります。低レベル放射線被ばくによるがんの発生割合は、主に広島・長崎の原爆被爆者のグループの調査結果を用いて評価されています。線量とがん発生の関係としては、約 100mSv 以上では、線量とともにほぼ直線的にがん発生割合が増加します。しかし、約 100mSv より低い線量域では、放射線被ばくによるがん発生割合が小さすぎるため、直線的にがん発生割合が増加するかどうかはわかりません。また、被ばく

したトータル線量が同じでも、例えば、原爆被爆者のように短時間にトータル線量すべてを受ける場合（時間当たりの線量が高い高線量率の被ばく）に対して、放射線を取扱う作業者のように長期間にわたって少しずつ受ける場合（時間当たりの線量が低い低線量率の被ばく）の方が、健康に与える影響の割合は低くなる傾向が動物実験などの研究で明らかになっています¹⁾。低い被ばく線量や低線量率で健康に与える影響が低くなる程度を示す指標として、線量・線量率効果係数（DDREF）が用いられます。ICRP は、低い被ばく線量（200mSv 以下）や低線量率（1 時間当たり 100mSv 以下）での放射線の人体に与える確率的影響の発生割合が、高い線量や高線量率での値の 2 分の 1 であるとし、DDREF の値を 2 とし、放射線の人体に与える確率的影響の発生割合を推定するように提案しています¹⁾。

ICRP では、低レベル放射線被ばくの人々の健康に与える影響を推定する場合、実験研究や疫学データの情報をもとに、放射線による確率的影響については、トータル線量とがん発生などの健康に与える影響は比例すると仮定しており、どれだけ小さい線量の被ばくを受けたとしてもそのトータルの被ばく線量に比例してがんが発生すると仮定したモデル（LNT モデル）を採用しています¹⁾。現在、ICRP 勧告やそれをもとにした我が国の放射線安全規制においては、この LNT モデルが前提とされていますが、LNT モデルの是非については様々な議論があります。フランスの科学アカデミーと医学アカデミーは、共同でまとめた報告書⁵⁾で、放射線によってがんが発生する被ばく線量には下限値があると主張しています。その報告書では、放射線生物学の研究成果から、放射線を被ばくすることによって損傷を受けた細胞が除去される機構があることや、疫学においても白血病の発症する割合が被ばく線量と比例していないことなどから、100mSv 以下の被ばく線量では、確率的影響を大きめに評価する LNT モデルを適用することは過大評価になるとしています。それに対して、米国国立アカデミーの BEIR（電離放射線の生物学的影響に関する委員会）Ⅶ報告書⁶⁾では、どんなに低い線量でも DNA の損傷が生じ、その結果として確率的に突然変異とがんに関連することから、確率的影響と被ばく線量の関係は LNT モデルで説明できるとして、フランス科学・医学アカデミーと反対の結論を主張しています。これらの議論を踏まえた上で、ICRP は、放射線防護や被ばく管理の実用的な目的のためには、LNT モデルを採用するとしています¹⁾。

ICRP の 2007 年勧告¹⁾では、これまでの広島・長崎の原爆被爆者グループなどの調査結果をもとに、この LNT モデルを用いて DDREF の値を 2 とし、推定した放射線被ばく当たりのがんによるリスク係数（放射線によるがん死亡率と寿命の損失やがん発生による生活の質の低下に基づく単位線量当たりのリスクを表す係数）を一般の人に対して 1Sv あたり 5.5%、大人のみ集団に対しては 4.1%であるとし、放射線管理の目的には概ね 1Sv あたり 5%というリスク係数を用いるのが適当であるとしています。リスク係数が大人のみ集団よりも、大人と子供の全部を含む一般の人に対しての方が大きいのは、年齢の若い子供のリスクが大人よりも高いことが原因です。ICRP は、小さな子供と子宮内での胎児の被ばくのリスクは同じ程度であり、最大でも一般の人のグループ全体のリスクのおよそ 2 から 3 倍と仮定することが妥当であるとしています¹⁾。これらを考慮して、福島第一原子力発電所

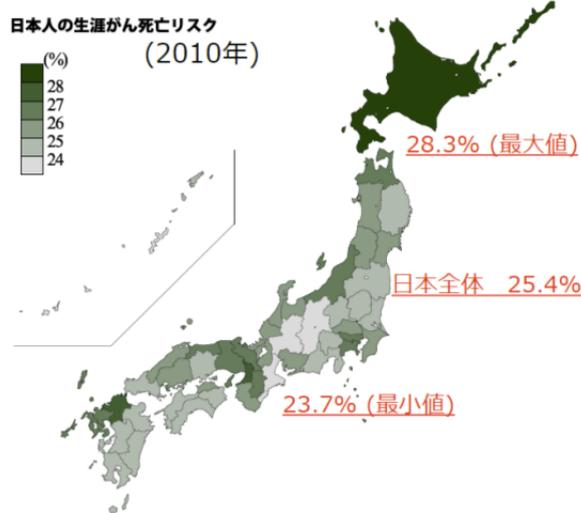
事故後においては、校庭や園庭などの小さな子供の生活環境の除染が優先的に実施されました。

1Sv あたり 5% のリスクを実感するためには、例えば、もともと日本人が持っているタバコ、飲酒、化学薬品やストレスなどのすべてを含めた生活上でのがんリスク、すなわち生涯を通してのがん死亡割合（以下、生涯がん死亡リスクという）がどれくらいかを知っておくことが重要です。図2に示すように、日本での2010年の生涯がん死亡リスクの全国平均値は25.4%であり⁷⁾、この数値は、日本人のおよそ4人に1人は通常的生活の中でがんで死亡していることを意味しています。仮に、日本人一人ひとりが全員100mSvの被ばくを受けるとすると、1Sv (1,000mSv) あたり5%のリスク係数であることからLNTモデルを仮定すると生涯がん死亡リスクは0.5%増加し、全国平均値は25.4%から25.9%に増加することになります。一方、この通常的生活の中での生涯がん死亡リスクは、食生活などの生活習慣の違いによって、もともと地域間で23.7~28.3%の間でばらついており⁷⁾、100mSvの被ばくによる0.5%のリスク増加は、このばらつきの中に埋もれてしまうほど小さいものです。疫学的な調査において、約100mSvより低い線量域では、受けた被ばく線量に比例してリスクを受けるかどうかはそのリスクが小さ過ぎてはつきりしませんが、仮にLNTモデルを前提にしてリスクがあると想定しますと、20mSvの被ばくでは0.1%、1mSvの被ばくでは0.005%のリスクの増加になります。

■ がんリスク 0.5%/100 mSv

- ICRPは、被ばくによる生涯がんリスクの上昇を、
100 mSv : 0.5% と推定し、
10 mSv : 0.05% と推定しています。
1 mSv : 0.005%
- 2010年の人口数・死亡数データを用いれば、日本人の生涯がん死亡リスク^{注)}は25.4% (男女の平均値) です。したがって、被ばくによる生涯がん死亡リスクの上昇の意味は、
25.4% → 25.9% (100 mSv)
25.4% → 25.45% (10 mSv)
25.4% → 25.405% (1 mSv) となります。
- 一方、生涯がん死亡リスクには、都道府県によって違いがあり、25.4%の生涯がん死亡リスクには
23.7% ~ 25.4% (平均) ~ 28.3%
のばらつきがあることとなります。
- この主な原因は、食生活などの生活習慣の違いにあると考えられています。

注) ICRPのがんリスクは、がんで死亡するリスク以外に、寿命の損失やがん発生による生活の質の低下を考慮に入れていますので、生涯がん死亡リスクを生涯がんリスクに換算すると、やや高くなります



出典 : H. Ogino and T. Hattori, Calculation of Background Lifetime Risk of Cancer Mortality in Japan, Jpn. J. Health Phys., 49(4), 194-198 (2014).

図2 生涯がん死亡リスクのばらつき⁷⁾

上で説明したように放射線の確率的影響としては、がんや遺伝的影響が考えられますが、最近の原爆被爆者の疫学調査、放射線治療患者やチェルノブイリ事故処理作業員などの健康影響調査研究で、がんだけではなく、心臓疾患、脳卒中、消化器疾患や呼吸器疾患など

のがん以外の疾患による死亡率についても、あたかも確率的影響のように被ばく線量とともに増加することが心配される事例が報告されてきました⁸⁾。しかし、このがん以外の疾患のリスクについては、まだその発症のメカニズムが十分解明されておらず、約 500mSv にしきい値があるとしても矛盾がないことから、ICRP の 2007 年勧告では、低レベル放射線の被ばくによるリスクの推定に含めないと判断されました⁹⁾。また ICRP は、その後に声明を発表し、心臓疾患や脳卒中などの循環器系疾患については、確定的影響の一つに分類することを明確にしています⁸⁾。

おわりに

日本原子力学会 保健物理・環境科学部会は、2000 年代初めまでの科学的知見と透明性のある議論の結果をもとに発表された ICRP の 2007 年勧告¹⁾の考え方を支持しています。この一つ前の主勧告である ICRP の 1990 年勧告⁹⁾は、我が国のみならず国際的にも現行の放射線安全規制のベースとなってきたものです。放射線審議会基本部会では、ICRP の 2007 年勧告の国内制度等への取入れについての第二次中間報告¹⁰⁾をまとめており、近い将来には、ICRP の 2007 年勧告¹⁾も国内規制に取入れられることでしょう。放射線防護や放射線管理の考え方は、新しい科学的知見を取入れながら絶えず進化してきています。今後、ICRP が従来と異なる DDREF の値、LNT 以外のモデルの採用、がん以外の疾患のリスクを放射線被ばくのリスクに含めるかどうか、などを検討していくためには、放射線影響に係る疫学研究やメカニズム解明のための生物研究などのさらなる知見の蓄積が望まれます。

参考文献

- 1) ICRP Publication 103: ICRP2007 年勧告, 2007.
- 2) Kouji H. Harada, etc, Radiation dose rates now and in the future for residents neighboring restricted areas of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Proc Natl Acad Sci U S A., 111(10), E914–E923, 2014.
- 3) UNSCEAR 2000 年報告書, 電離放射線の線源と影響, 2000.
- 4) UNSCEAR 2006 年報告書, 電離放射線の影響, 2008.
- 5) フランス科学アカデミー: 「低線量電離放射線の発がん影響評価と線量効果関係」, 2004.
- 6) 米国科学アカデミー: BEIR-VII 報告書「低レベルの電離放射線の被ばくからの健康影響」, 2006.
- 7) 日本原子力学会, 特集 東電福島第一事故から 5 年を経て-原子力学会活動の総括と課題, 保健物理・環境科学部会の取り組み, 日本原子力学会誌, Vol.58, No.7, p393-394, 2016.
- 8) ICRP Publication 118: 組織反応に関する ICRP 声明 / 正常組織・器官における放射線被ばくの早期及び晩発影響- 放射線防護の観点から見た組織反応のしきい線量, 2012.
- 9) ICRP Publication 60: ICRP1990 年勧告, 1991.
- 10) 放射線審議会基本部会, 国際放射線防護委員会 (ICRP) 2007 年勧告 (Pub. 103) の国内制度等への取入れについて-第二次中間報告-, 2011.
- 11) UNSCEAR 2008 年報告書, 放射線の線源と影響, 2008.

注 1

mGy は、物質や人が放射線からのエネルギーを受けた量を表す線量（「吸収線量」という）の単位で、物質も人も区別しない値です。物質や人に放射線が当たり、1kg 当たり 1J(ジュール)のエネルギーが与えられた場合の吸収線量が 1Gy（グレイ）であり、その千分の一が 1mGy です。

本文で述べている確定的影響に関しては、本来、放射線による被ばくの影響の割合に対応する線量（「等価線量」という）の Sv（シーベルト）で表すべきですが、下記の注 2 で述べる実効線量（これも同じ Sv の単位を用いる）と区別するために、ここでは吸収線量 Gy を使っています。X 線やガンマ線では吸収線量 Gy と等価線量 Sv は同じ値となります。

注 2

mSv は、実効線量の単位です。実効線量とは、放射線防護や放射線管理の目的で用いる被ばく線量です。同じ吸収線量を被ばくする場合でも、全身に受ける場合と一部の臓器（局所的）に受ける場合では、確定的影響や確率的影響が発生する割合が異なるが、実効線量は、それぞれの器官・組織に受けた線量を、放射線によるがんなど（遺伝的影響も含む）の起こりやすさで重み付けの補正を行うことにより、全身での総合的ながんの割合に対応した被ばく線量を示しています。全身にガンマ線や X 線が 1mGy 当たれば、実効線量もおおよそ 1mSv と考えられます。単位は Sv を用い、Sv の千分の一である mSv がよく用いられます。「原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (UNSCEAR)」の報告書^{3, 11)}では、自然の放射線により一般の人が受ける実効線量は、世界の平均値として年間 2.4mSv であると報告されています。

平成 21 年 2 月作成
日本原子力学会
再処理・リサイクル部会

燃料サイクルと核不拡散

現在我が国で稼働中の原子力発電所の原子炉は全て軽水冷却型原子炉(軽水炉)です。この原子炉は、燃料として、天然ウランに 0.7%しか含まれていないウラン-235 を 3~5%に濃縮した、いわゆる低濃縮ウランを使います。この濃縮の段階では、核兵器への利用を意図する高濃縮ウラン(ウラン-235 を 70%以上に濃縮したもの)が製造されないことを国際的に監視しています。天然ウランの残りの 99.3%を占めるウラン-238 はほとんど利用されていません。今後の世界の経済状況、原子力の需要にも影響されますが、軽水炉だけでウランを利用し続けると、ウラン資源の寿命は数 10 年から 100 年とされています。しかし、ウラン-238 も有効に利用できる高速増殖炉が実用化すればウラン資源の寿命は千年オーダーまで長くすることができます。そのためには高速増殖炉の研究開発を進めることと、軽水炉の中でウラン-238 から生成されるプルトニウムを高速増殖炉用の燃料にするために取り出す再処理を行うことが必要になります。軽水炉の燃料製造から軽水炉での燃焼、そして再処理により使用済燃料からウランとプルトニウムを取り出し高速増殖炉用の燃料を作り高速増殖炉で燃焼する、これらの仕組み全体のことを燃料サイクルと呼びます。

燃料サイクルを実現するためには燃料サイクルの技術開発だけでなく、ウランやプルトニウムが原子炉で燃焼した時にできる核分裂生成物(FP)を分離して安定的な形にした高レベル廃棄物を安全に隔離する処分場の整備と、濃縮ウランやプルトニウムが軍事目的に転用されないよう、国際的に監視する核不拡散の仕組みの整備が不可欠です。前者は 2000 年に設立された原子力発電環境整備機構(NUMO)が建設準備を進めています。日本原子力学会は技術的側面からこの活動を支援しています。後者の核不拡散の問題は、北朝鮮やイランの問題がきっかけとなって国際社会の重要課題となっており、国際原子力機関(IAEA)や米国などから様々な改善案が提案されています。重要なことは、そのいずれの案も燃料サイクルを否定する方向ではなく、国際的な新たな仕組みの構築によって燃料サイクルの平和利用を肯定する方向に向かっていることです。

国内に十分な天然資源を持たない我が国は、有限な資源を極力有効に利用することが重要と考え、この燃料サイクルを実用化することを国(原子力委員会)の方針としています。日本は、燃料サイクルの平和利用を進める新しい国際的枠組み作りに積極的に参加しています。また、日本原子力研究開発機構を中心として核不拡散性を高める技術の研究開発も継続的に行われています。

日本原子力学会は、燃料サイクルに関する研究発表や議論を行うとともに、技術課題のピアレビューを実施することにより、我が国の燃料サイクル技術の確立に貢献しています。

(参考)

(核不拡散について、原子力委員会、原子力政策大綱、平成 17 年 10 月、よりの抜粋)

我が国は世界の核兵器の全面的な廃絶を目標に掲げるとともに、唯一の被爆国として「核兵器を持たず、作らず、持ち込ませず」との非核三原則を堅持し、原子力の研究、開発及び利用を厳に平和の目的に限って推進することとしている。このため、核兵器不拡散条約 (NPT) に加入し、国際原子力機関 (IAEA) と包括的保障措置協定及び追加議定書を締結するとともに対応する国内保障措置制度を整備・充実してきている。近年においても、六ヶ所再処理工場において、大規模な保障措置活動を実施するため、六ヶ所保障措置センター等を整備するなど、その充実・強化に努めている。また、使用済燃料の再処理においては、東海再処理工場にかかる日米再処理交渉における合意の条件の一つとして、純粋なプルトニウム酸化物の存在する工程を不要とする核拡散抵抗性の高い技術(混合転換技術)を開発、採用してきた経緯があり、同技術は六ヶ所再処理工場においても採用された。今後、混合酸化物 (MOX) 燃料の軽水炉利用 (プルサーマル) の実施や六ヶ所再処理工場の本格稼動に当たって、国と事業者は、平和利用の堅持と国際約束・規範の遵守の重要性を再認識するとともにこれらを実践する姿を国民や国際社会に明確に示していくことが重要となっている。

1) 再処理・リサイクル部会、再処理・リサイクル部会の活動 開発支援と情報発信を目指して、原子力学会 50 周年記念号。

原子力の事故情報の発信、評価について

－ 学会員としての姿勢－

平成 21 年 2 月作成

日本原子力学会

原子力発電部会

我々日本原子力学会員（以下、「会員」という。）は、原子力の研究、開発、利用および教育に取り組むにあたり、原子力技術が人類に著しい利益をもたらすだけでなく、大きな災禍をも招く可能性があることを深く認識する。会員は、原子力という技術を扱う集団・技術者として、一般社会から一種の付託を受けている。それは、一般社会との無言の契約が成立していることであり、その契約のもとに、会員に特別の責任・倫理観を求めていることを常に念頭に置き、行動しなければならない。これらの認識の下、公衆の安全を全てに優先させ、自らの行動を通じて社会の信頼を得るよう努力する。

その一貫として、会員は、原子力事故情報の発信および評価に関して、以下の心構えおよび言行に基づき、常に真摯に対応する。

1. 原子力の安全に係る情報は、適切かつ積極的に公開する。会員は、情報の意図的隠蔽は社会との良好な関係を破壊することを認識し、たとえその情報が自分自身や所属する組織に不利であっても積極的な公開に努める。また、所属する組織が情報公開の手順を定めていない場合は、会員は、適切な公開が可能となるように手順の制定を組織に働きかける。
2. 会員は、公衆の安全上必要不可欠な情報については、所属する組織にその情報を速やかに公開するように働きかけるとともに、必要やむを得ない場合は、たとえ守秘義務違反に係る情報であってもその情報を開示する等により、公衆の安全の確保を優先させる。
3. 会員は、公衆が理性的に自ら判断できるよう、情報を提供することに努める。
4. 原子力に係る情報でも、核不拡散や核物質防護、公衆の安全・利益等のために公開することが不適切と判断されるものについては公開する必要はない。ただしその場合でも、会員はそのことを明示し、公開できない理由を説明する。
5. 会員は、専門家として正しい情報を取得し、その正しさを自ら確認する。特に安全に係る情報は、公衆や環境に大きな影響を与える可能性があるため、その正確な取得と確認に十分な注意を払う。
6. 会員は、与えられた情報を無批判に受け入れることなく、情報収集に努めた上で、それに関連する専門能力により自ら判断する。
7. 会員は、事実を尊重し、科学的に明白な間違いに対しては毅然とした態度でその間違いを指摘し、是正するよう努める。
8. 会員は、経験から教訓を学び取る。特に原子力施設の事故や故障の経験からは、できるだけ多くのことを学び、その再発防止に努めるとともに、技術・知見の継承に努める。

なお、日本原子力学会では、「原子力学会倫理規程」および「行動の手引」を制定し、会員の倫理の向上を図っている。

以 上

「量子ビーム利用の可能性について」

平成 21 年 2 月

平成 27 年 12 月改訂

日本原子力学会

加速器・ビーム科学部会

「量子ビーム」はいわゆる「放射線」に類似した概念ですが，我が国で独自に導入されたもので，欧米には対応する言葉がありません。専用の装置から得られる高強度で高品位な光量子・放射光などの電磁波や，中性子線，電子線，イオンビームなどの粒子線を意味します。アルファ線，ベータ線，ガンマ線など従来の古典的放射線よりも広範囲の，方向性を持った「ビーム」を広く包括する概念です。放射性同位元素から放射線をビーム状に取り出せば物理的実体としては量子ビームと同じものになりますが，通常「量子ビーム」と言えば人工的にビームを発生する装置である加速器などから直接／間接に供給される様々なビーム，あるいはこれらの一次ビームを何らかの標的に当てて得られる二次ビームのことを言います。ビームを形成する粒子の種類は上記のように非常に多様であり，またこれらの粒子のエネルギーは低温の熱エネルギーから原子核・素粒子実験で使用される超高エネルギーまで広範囲に及んでいます。量子ビームと加速器は，いわゆる原子力が誕生する少し前から基礎科学，特に物理学の研究のツールとして発展してきました。しかし近年は加速器やその周辺技術の進歩により，産業，医療などにも応用が拡大しており，更なる展開が期待されています。

量子ビームは「エネルギー」の流れであると同時に，粒子の種類によっては「物質」の流れでもあります。また，一般にエネルギーを高くすると透過力が強くなってきます。これらを利用することで基礎科学から産業，医療にわたる非常に広い分野で応用が可能です。まず対象とする標的に照射することによってエネルギーとして注入し，標的に様々な変化を与えることができます。エネルギーや粒子の種類を選ぶと，狙った深さに狙っただけのエネルギーを与えられます。このエネルギーにより内部で化学反応を誘起したり，急激な温度変化によって材料の性質を変化させることもできます。このような材料加工の例として，自動車用タイヤの材料などに電子線を照射し，性質を改善する技術があげられます（図 1）。加熱や他の物質との化学反応によっては実現できない高度な加工が可能です。また有害な物質に照射して無害化することも可能です。



図 1：電子ビームを照射して作られた自動車用ゴム，プラスチック製品
（左）ラジアルタイヤ（中）エンジンルームの耐熱性電線（右）フロントパネル

一方、人体に照射すれば体内の奥にあるガンを選択的に破壊できます。また医療機器などに照射すれば滅菌に使えます。また食品に照射することで滅菌や保存性の向上が可能です。加熱や化学物質を加える必要もなく、非常に安全な処理が簡単にできます。ビームの種類とエネルギーを選べば食品が放射能を持つ心配もありますが、ガンマ線によるジャガイモの発芽防止処理以外は我が国ではまだ認可されていません。その他の生物学的作用の応用としては、作物の品種改良があります。

従来の X 線やガンマ線に比べ、加速器からの高速重イオンビームは高いエネルギーを作物の遺伝子に局所的に与えることができるので、今までにない突然変異を誘発する方法としての開発も進んでいます（図 2）。小さな細胞の狙った場所に高エネルギーのイオンを一個だけを照射し、影響を調べる研究も始まっています。これには近年のビーム制御技術の進歩が大きく貢献しています。

また、意外かも知れませんが今日の IT 産業の急速な発展には量子ビームと加速器の技術が大きな役割を果たしています。IT 技術に不可欠な半導体素子内部の微細なパターンの回路は、通常、高精細なネガフィルムに相当する原版を使って写真の焼き増しをするように作られます。これは大量生産に適しており、この原版を作るとき、非常に細く絞った電子線によって回路パターンの描画が行われます。光では波としての性質が出るため十分なサイズに絞ることが困難なためです。



ダリア（美榛）
財団法人広島市農林水産振興センター

バラ（ブライダルファンタジー）
神奈川県農業技術センター

図 2：重イオンビーム照射で誘発した花卉植物の変異体
(写真提供：理化学研究所 仁科加速器研究センター 生物照射チーム 阿部知子先生)

一方、必要とする原子のイオンを「物質」として材料標的に打ち込むことにより、他の方法では不可能なところに望みの物質を注入できます。半導体デバイスの製造においては、半導体基板に微量の不純物元素を狙った量だけ、狙った深さに注入する必要があります。不純物を外部から熱拡散によって注入することも可能ですが、より集積性の高い場合には制御性に限界があります。現在では加速器からのイオンを直接注入することで、これを実現しています。もちろん、これら以外にもエネルギーの側面、物質としての側面の両方を同時に利用した様々な応用が可能です。

量子ビームを標的に照射すると、しばしば標的から光量子を含む二次粒子が発生します。またエネルギーが十分あればビームはその標的を通過します。これらのエネルギー、強度、種類を測定すれば従来の化学分析などでは実現できなかった高感度で精密な各種の組成・構造分析ができ

ます。人体に X 線を照射して診断を行う手法は説明の必要がないほどに普及しています。逆に調べたい試料の一部をイオン化して加速器で加速し、ビームにして放射線検出器で測定すれば、一粒ずつをカウントできるので、原理的に原子一個からの超高感度分析も可能です。

このように、広義の原子力である量子ビームと放射線の技術は今や様々な分野で不可欠なツールになっています。あまり知られていませんが、最近の調査によると、実はこれらの経済規模は現時点で原子力発電のそれとほぼ同じであることが分かっています。最近では、量子ビームを用いて福島原発事故への取り組みも行われています。これらの量子ビームを使った原子力発電に直接関係のない医療・農業・工業応用の研究も原子力の重要な一部として社会的に認知されています。一方、将来に向けて加速器からのビームを直接原子力／核融合のシステムに組み込んでエネルギーを発生させたり、厄介な放射性物質をより害の少ないものに変える技術の研究開発も進められています。上記の様々な事例のうち、いくつかは放射性同位元素からの古典的「放射線」でも実現不可能ではありません。しかしビームに方向性を与えられる、強度が大きい、エネルギーと粒子の種類が制御できる、オン・オフが可能などの点で格段に優れているため、多くの場合、加速器から得られる量子ビームの利用が不可欠です。ただし、加速器は一般に大型で高価であるので、常にコストを考えねばなりません。加速器はその内部で高電圧を発生させ、その電場で電子、イオンなどの電気を帯びた粒子（荷電粒子）を加速します。装置の種類によっては磁場を使って誘導電場を発生させ、これを加速に使うこともあります。これらをそのままビームとして取り出して利用できますが、光量子、中性子などは電気を持っていないので加速器では直接加速できません。そこで、加速器でいったん適当な荷電粒子を加速して標的に当てるなどの方法でこれらの非荷電粒子を二次的に発生し量子ビームとして取り出します。

我が国の大型放射光施設「SPring-8」(<http://www.spring8.or.jp/ja/>)、大強度陽子加速器施設「J-PARC」(<http://j-parc.jp/>)、X線自由電子レーザー施設「SACLA」(<http://xfel.riken.jp/index.html>)はそれぞれ高強度で幅広いエネルギー範囲の光量子、中性子ビーム、および高強度 X 線レーザーを発生できる世界有数の装置であり、これらを用いた各種材料、タンパク質などの精密構造解析により、新材料や新薬の開発が大きく発展することが期待されています。近年の著しい技術の進展により、得られる量子ビームの範囲はさらに拡大しつつあり、放射性同位元素のイオンのビームまで利用できるようになっています。また、これらを照射・測定する際の空間的・時間的な精度も飛躍的に向上しつつあります。

量子ビームの応用は多様性に富んでいるため、小型の加速器から得られる低エネルギーのビームで十分な場合もありますが、これらの小型装置でも通常は一部屋を占有してしまうのが現状です。一方で高エネルギーのビームを必要とする場合も多く、この場合は非常に大きなスペースが必要で、コストもかかります。特殊な大型加速器には直径が数キロメートルに達するものがあります。例えば、現在深部ガン治療に用いられる高エネルギーイオン加速器は、体育館にやっと入るくらいの大きさになってしまいます。これがテーブルに載る程度に小型化できれば、どこの病院にも設置することができ、医療に革命的なインパクトをもたらします。通常電気工学的方法で電極間に発生できる電圧（電界）には限度があるので、プラズマやレーザーの超高強度の電場を利用して加速を行い、小型で高エネルギーのビームを得るための基礎研究も進められています。加速器は電気製品の一つなのですが、物理実験用の研究装置として発展してきたこともあり、一般に家電品と比べるとまだ信頼性は高くありません。医療・産業応用が今後進展するに従い、小型・

低コスト化はもちろん、信頼性やエネルギー効率の向上も極めて重要です。いずれにせよ量子ビームの利用拡大は加速器技術の発展と表裏一体であり、両者は緊密な連携のもとに並行して進めねばなりません。

以上のように、量子ビームは今や我々の生活になくてはならないツールとなり、未踏の基礎研究領域の開拓や全く新しい産業分野の創生にも貢献するようになってきました。

燃料のリサイクル

我が国では、現在、エネルギー資源（石油、石炭、天然ガス、ウランなど自然界に存在し、発電や動力機関などに用いられるもの）の96%を輸入に頼っており、これを安定に確保することが重要な課題となっている。原子力発電所（軽水炉）で使われている燃料は、一定期間で取りだし、新しい燃料に取り替えなければならない。しかし、取り出した燃料（使用済燃料）には、消費されなかったウランや発電の過程で新しく生まれたプルトニウムなど、まだ使える貴重なエネルギー資源が含まれている。使用済燃料を再処理して、使用済燃料からウランやプルトニウムを取り出して再び原子力発電所で燃料として利用することを燃料のリサイクルと呼ぶ。一度使用した燃料をリサイクルせずに、そのまま処分する方針をとっている国もあるが、国内に十分なエネルギー資源を持たない我が国は、有限なエネルギー資源を極力有効に利用してエネルギー資源の安定供給に貢献するために、燃料のリサイクルを実用化することを国の方針としている¹⁾。

以下に、燃料のリサイクル実現に向けた我が国の取り組み状況^{2), 3)}を記す。

軽水炉の使用済燃料の再処理は、これまで日本原子力研究開発機構（JAEA）の東海再処理工場と海外の再処理事業者への委託で実施されてきた。東海再処理工場は1981年1月の操業開始以来、その処理実績は2010年3月末で約1,140tである⁴⁾。また、海外の再処理事業者への委託量は7,100tである⁵⁾。今後、使用済燃料の再処理は国内で行うことを原則としており、わが国初の商業規模の再処理工場である日本原燃（JNFL）六ヶ所再処理工場が近い将来の運転開始を目指している。

再処理で回収されたプルトニウムは、すでに利用が始まっているように当面は軽水炉で混合酸化物（MOX）燃料として利用し（プルサーマル）、将来は高速増殖炉（FBR）で利用することが計画されている。海外委託再処理により回収されるプルトニウムは海外において、また、六ヶ所再処理工場で回収されるプルトニウムは国内において、それぞれMOX燃料に加工するものとし、国内のMOX燃料加工工場については、2015年度しゅん工⁶⁾を目途に施設の建設に向けた手続きを進めている。

高速増殖炉（FBR）は、2050年頃から商業ベースでの導入を目指している¹⁾。これに備えるため、現在、JAEAが中心となって、FBRサイクル、即ち、FBR、FBR再処理、FBR燃料製造の各技術を研究開発している。また、FBR導入後しばらくの間は軽水炉とFBRが併用される。この期間（軽水炉からFBRへの移行期）、再処理工場は、軽水炉、プルサーマル炉、FBRの使用済燃料の再処理が求められる。これまでの運転、補修および改善等の実績を十分反映した上で、日本の国情に適合した燃料のリサイクルの確立が望まれる。

日本原子力学会は、燃料のリサイクルに関する研究発表や議論を行うとともに、技術課題のピアレビューを実施することにより、我が国の燃料のリサイクルの確立に貢献している。

- 1) 原子力委員会、原子力政策大綱、平成 17 年 10 月。
- 2) 再処理・リサイクル部会、再処理・リサイクル部会の活動、日本原子力学会誌, **51**[4], 302(2009).
- 3) 再処理・リサイクル部会, “再処理・リサイクル技術開発と我が国の開発への提言”, 日本原子力学会誌, **50**[9], 562(2008).
- 4) 独立行政法人日本原子力研究開発機構ホームページ、
<http://www.jaea.go.jp/04/ztokai/tokai/center/saishori/>.
- 5) 電気事業連合会ホームページ、http://www.fepc.or.jp/faq/1189502_1457.html.
- 6) 日本原燃株式会社ホームページ、<http://www.jnfl.co.jp/mox/index.html>.

クリアランス

2019 年9月
日本原子力学会
バックエンド部会

1. はじめに

原子力発電所の運転・補修や廃止措置に伴って様々な種類の廃棄物が発生します。これらの中には、放射線防護のための管理を要する「放射性物質として扱うもの」以外に、元々放射性物質による汚染のないものや、図1に示す日常生活における放射線と比較しても、放射性物質の放射能濃度が極めて低く人体への影響が無視できるほど小さく「放射性物質として扱う必要のないもの」が含まれています。

これらの「放射性物質として扱う必要のないもの」を、法令等で規定された手続きに基づき、放射線防護のための管理から外すことを「クリアランス」、または「クリアランスする」といいます。クリアランスされたものは、普通の産業廃棄物として取り扱うだけでなく、資源として有効に再利用することができます。海外では、既に多くの国においてクリアランス制度が運用されており、わが国でも2005年度に法令が改正され、クリアランス制度が導入されました。

2. クリアランスの基準

クリアランス制度では、クリアランスされた金属やコンクリート等が、廃棄物として埋め立てられても、また、どのように再利用されても、人体への影響がないように、放射能濃度の基準を設けています。この濃度基準を「クリアランスレベル」といい、基本的に、1年間に受ける放射線の量(実効線量)が0.01ミリシーベルト(10マイクロシーベルト)となる放射能濃度^{注1)}に定められています(図1、赤枠)。

この線量は、私たちが自然界の放射線から受ける線量の1/100以下であり、仮に複数の線源からの影響が重なった場合でも、人体への影響が無視できるほど小さいと国際的に認められたものです。

クリアランスレベルは、現在では、WHO(世界保健機関)など8つの国際機関の協調の下に、IAEA(国際原子力機関)が一般安全要件第3部 No. GSR Part3 (2014)²⁾において放射性核種毎の放射能濃度を定めています。

クリアランスレベルの設定で主に使用された線量指標である10マイクロシーベルト/年は、IAEAの上級専門家グループの声明³⁾やICRP(国際放射線防護委員会)のPub. 46(1985)⁴⁾における放射性廃棄物の規制免除に係る検討を始めとして、多年にわたる数々の議論を踏まえ、現在又は将来において複数の線源から被ばくする可能性を考慮して選択されたものです。この線量指標は、個人が自然放射線及び医療被ばくを除くその他の線源からの可能性のある被ばくを考慮に入れて定められた線量限度である1ミリシーベルト/年に対して、人体への影響が無視できるほど小さい線量である10~100マイクロシーベルト/年(年死亡リスクレベルにして 10^{-7} ~ 10^{-6})の範囲の中で下限の値に相当するものです⁵⁾。

わが国においても、上記の国際安全基準に至るまでの議論において算出されたクリアランスレベル⁶⁾に基づき、放射線審議会がクリアランスを適用できる⁷⁾としています。

日常生活と放射線

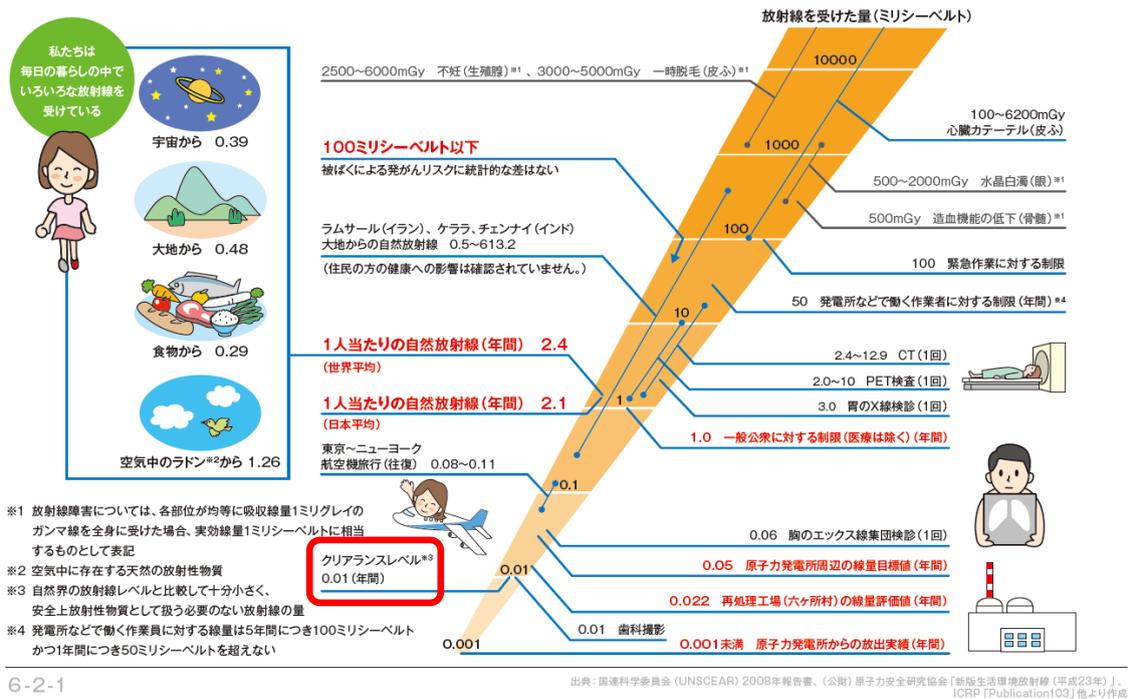


図1 日常生活と放射線¹⁾

3. クリアランス制度の導入経緯

わが国におけるクリアランス制度⁸⁾は、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」の2005年の改正で制定され、原子炉施設において運用が開始されました。わが国のクリアランス制度の概要として、廃棄物の発生から埋設または再利用に至るまでのフローを図2に示します。クリアランスレベルとしては、原子炉施設で重要とされる33核種が選定され、前記のNo. GSR Part3 (2014)に取り込まれたIAEAの安全指針文書RS-G-1.7⁶⁾で示された値を採用しています。同制度では、クリアランスされたものに本来放射性物質として扱われるべきものが混在することのないように、同法第61条の2に基づき、各原子力事業者は、放射能濃度の測定及び評価の方法について国の認可を得た上で測定及び評価を行い、その後、測定及び評価結果について国の確認を受けるといふ、2段階の規制関与がある厳格な運用システムとなっています。

クリアランスされたものは、法令上は放射性物質として扱う必要がなくなりますが、同制度の整備と運用について国民の理解を踏まえた上で再利用等を進めることとしているため、当面の間は、搬出先について事業者が自主的な管理を行うとともに、原子力関連施設で再利用することとされています。

その後、核燃料物質使用施設から発生する照射した核燃料物質で汚染されたもの⁹⁾、ウラン取扱施設から発生する金属¹⁰⁾、放射性同位元素使用施設及び放射線発生装置施設から発生する放射性物質で汚染されたもの¹¹⁾に係るクリアランスレベルも順に検討され、法整備されています^{注2)}。

注1) ウラン238等の自然界に存在する核種に対する放射能濃度値は、規制除外の概念に基づき、世界規模での土壤中の放射能濃度分布の上限に対する考察を踏まえて定められています。

注2) 放射性同位元素使用施設及び放射線発生装置施設から発生する放射性物質で汚染されたものに関するクリアランスは、「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」に定められています。

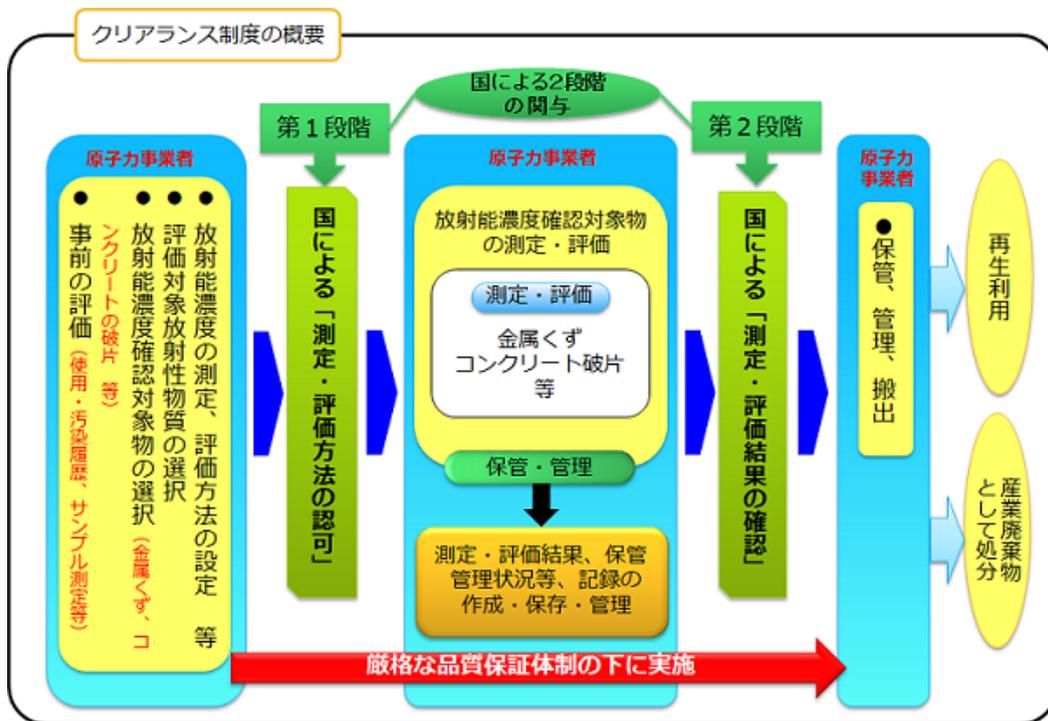


図2 わが国のクリアランス制度の概要⁸⁾

参考文献

- 1) 一般財団法人日本原子力文化財団, 原子力・エネルギー図面集, 第6章 放射線, 2016.
- 2) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna, 2014.
- 3) Statement by the Group of Senior Experts on General Principles for Exemptions from the Basic Safety Standards, IAEA, 22nd-24th, 1985 (社団法人日本アイソトープ協会 訳)
- 4) ICRP Publication 46, Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste, Annals of the ICRP 15, No. 4, Pergamon Press, Oxford, 1985 (「放射性固体廃棄物処分に関する放射性防護の諸原則」, 社団法人日本アイソトープ協会 訳)
- 5) ICRP Publication 104, Scope of Radiological Protection Control Measures, Annals of the ICRP 37, No.5, Elsevier Ltd., 2007 (「放射線防護の管理方策の適用範囲」 社団法人日本アイソトープ協会 訳)
- 6) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.7, IAEA, Vienna, 2004.
- 7) 放射線審議会基本部会, 「放射性固体廃棄物埋設処分及びクリアランスに係る放射線防護に関する基本的考え方について」, (平成22年1月)
- 8) 原子力規制委員会, クリアランス制度の概要,
<https://www.nsr.go.jp/activity/regulation/nuclearfuel/haiki4.html>
- 9) 文部科学省研究炉等安全規制検討会, 「試験研究用原子炉施設等の安全規制のあり方について」, (平成17年1月14日)
- 10) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会, 「ウラン取扱施設におけるクリアランス制度の整備について」, (平成22年11月)
- 11) 文部科学省科学技術・学術政策局放射線安全規制検討会, 「放射線障害防止法に規定するクリアランスレベルについて」, (平成22年11月, 平成24年3月一部訂正)

2010年7月
日本原子力学会
社会・環境部会

原子力発電の二酸化炭素削減効果

地球温暖化問題は世界的規模で人類が取り組む最大の環境問題の一つである。温室効果ガスがもたらす地球温暖化は、将来世代の生存環境に大きな影響を与える可能性が懸念され、2009年7月のG8ラクイラ・サミットで、2050年までに全世界で現状から温室効果ガス排出量を少なくとも半減、中でも先進国については80%以上の削減が必要であるとの認識が合意された。これを受け、我が国は2020年に温室効果ガスを1990年比で25パーセント削減するという非常に高い目標に向けて取り組むことを、国連や気候変動枠組条約締約国会議（COP）などの場で国際的に表明している。¹

この高い目標をどのような具体策により実現するかが、我が国に課せられた大きな課題であるが、以下に示すとおり、原子力発電に期待される役割は非常に大きい。

我が国の主要温室効果ガスである二酸化炭素の発生量の約34%は発電を含むエネルギー転換部門で発生し、運輸部門からは約19%が発生している。発電による二酸化炭素発生の電源別内訳は、石炭、石油、天然ガスなどの化石燃料を燃焼する火力発電の割合が約65%を占めており、原子力発電の割合はおよそ30%である。

発電に伴う二酸化炭素の発生源には、発電燃料の燃焼に伴う直接的なものと、燃料採掘、輸送、発電設備の建設、廃棄物処理などの活動に伴う間接的な発生源がある。両方含めて、トータルの環境負荷を分析・評価する手法がライフサイクル評価（LCA；Life Cycle Assessment）である。火力発電の場合直接的な発生が大半を占め、LNG火力、石炭火力および石油火力の場合、それぞれ約80%、90%および95%である（図1）。一方、水力、太陽光、風力は、発電設備の建設に伴う二酸化炭素排出量が大半である（図2）。原子力発電は図1に示すとおり、ライフサイクルを通じて発生する二酸化炭素量が火力発電よりも20～40分の1と、格段に少ない上、今、脚光を浴びている太陽光発電よりもさらに少ないことから、二酸化炭素排出削減の切り札的存在であるということが出来る。

また、自動車をはじめとする運輸部門では、ハイブリッドカー、電気自動車、燃料電池自動車の開発と市場投入、あるいはモーダルシフトにみられるように、燃料の脱化石資源化の流れが顕著になってきている。原子力発電は、供給リスクの低いウラン資源とその有効利用技術に基づく安定した大規模電源であること、高温ガス炉から得られる高温を利用した水素製造など、間接的に運輸部門において代替燃料を供給する可能性をも有している。

原子力発電の二酸化炭素削減効果を纏めると以下の通りである。

1. 原子力はわが国ゼロ・エミッション電源の中核である

2008年7月に閣議決定された低炭素社会づくり行動計画でも、原子力発電は低炭素エ

¹ 世界の全主要国が参加する公平で実効性のある国際枠組みの構築と、意欲的な目標の合意がなされることを前提としている。

エネルギーの中核として、地球温暖化対策を進める上で極めて重要な位置を占めるとして、原子力の推進が明言されている。

2. 火力発電を原子力で代替することにより温室効果ガスの発生を削減できる

石油火力発電所の 100 万 kW 分の電力を原子力発電所により置き換えると、年間約 700 万トンの二酸化炭素を削減²することができる。また、現在わが国で稼働している全ての原子力発電所の設備利用率を一律 1 % 向上させることによる二酸化炭素削減効果は年間約 300 万トンである。³

3. 輸送燃料の脱化石資源化に対し原子力エネルギーの活用が期待される

自動車、船舶など運輸では化石燃料の有限性に鑑み脱化石資源化の流れが加速していくことが予想される中で、直接的には電気また間接的には水素製造などの形で運輸部門のエネルギー供給源になる可能性を有している。

4. 温室効果ガス削減に対し最も大きな効果が期待できる発電技術は原子力である

25%削減と言う高い目標を達成するためには太陽光、地熱発電、風力発電、バイオマス発電等の再生可能エネルギー電源も最大限に活用しなければならない。しかし、太陽光発電や風力発電は、性能が気候条件に大きく依存していて発電量が不安定という根本的問題を有しており、発電規模を拡大する場合には蓄電池を併設する等の対策が必要となるが、そのシステムや費用負担など未解決の課題が残されている。原子力発電は、国内で既に 40 年以上の運転実績がある実証技術であり、安定した電気を供給できる、温暖化防止に最も有効な電源技術である。

² 電気事業連合会資料

³ 本藤祐樹、内山洋司、森泉由恵「ライフサイクル CO₂ 発生量による発電技術の評価」電力中央研究所報告 Y99009(平成 12 年 3 月)

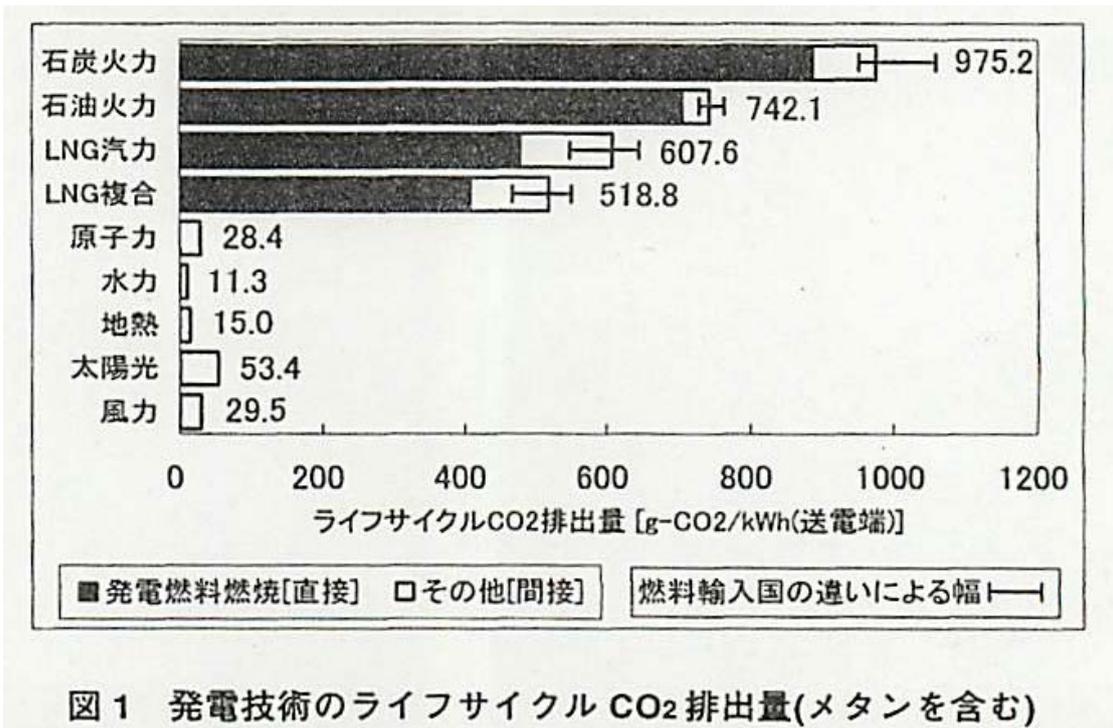


図1 発電技術のライフサイクルCO₂排出量(メタンを含む)

注) 二酸化炭素排出量には温室効果ガスであるメタンを含む。

「その他」は発電所の建設や燃料の採掘などにおける二酸化炭素排出量を表す。

(出典：電力中央研究所報告 研究報告：Y99009 平成12年3月)

図1 発電方式のライフサイクル二酸化炭素排出量

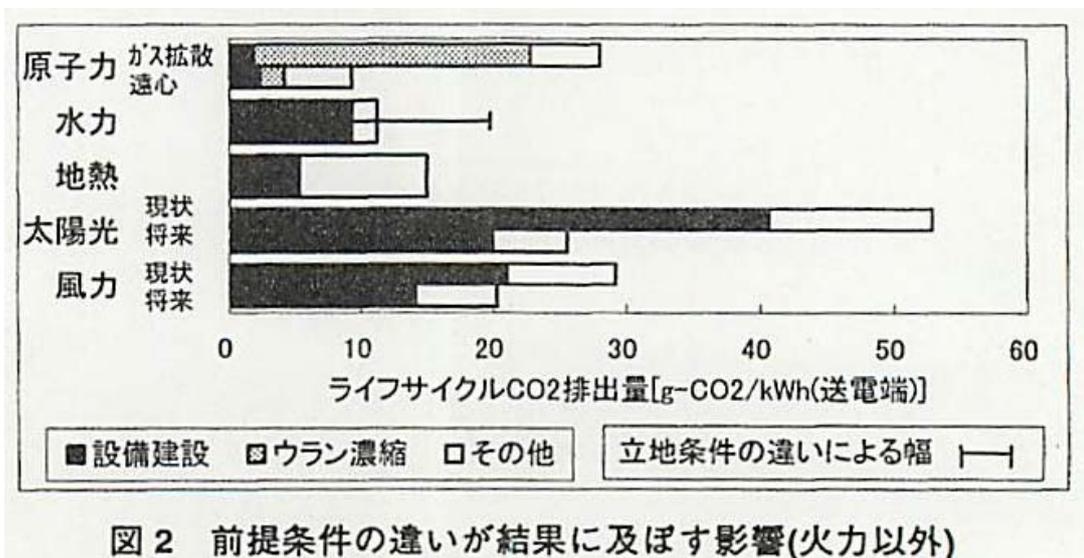


図2 前提条件の違いが結果に及ぼす影響(火力以外)

(出典：電力中央研究所報告 研究報告：Y99009 平成12年3月)

図2 前提条件の違いが結果に及ぼす影響 (火力以外)

参考文献：

- ・ 環境省、「平成 21 年版 図で見る環境・循環型社会・生物多様性白書」
- ・ 本藤祐樹、内山洋司、森泉由恵、電力中央研究所報告「ライフサイクル CO₂ 発生量による発電技術の評価 ―最新データによる再推計と前提条件の違いによる影響」電力中央研究所報告 Y99009(2 平成 12 年 3 月)
- ・ 電気事業連合会、「電気事業のいま」
- ・ 日本エネルギー経済研究所、「EDMC'09 エネルギー・経済統計要覧」

2010年7月

日本原子力学会

保健物理・環境科学部会

自然放射性物質を取り扱う作業者の放射線防護

放射性物質というと原子力施設に特有なものと思っておられる方が多いかも知れませんが、実は通常の産業で日常的に使われている自然の鉱物や鉱石にも放射性物質が含まれているものがあります。なぜ、天然の物質に放射性物質が含まれるかですが、それはもともと地球が誕生したときに、多くの放射性物質が存在していたからです。その内の多くは、長い年月がたつうちに放射線を出さない安定な元素に変化しましたが、半減期の長い物質だけがまだ残っているのです。これらの自然に存在する放射性物質から出る放射線の性質は、人工的に作られた放射性物質から出る放射線の性質と何も変わりありません。

放射線防護の世界的な権威である国際放射線防護委員会（ICRP と言います）は、このような自然の放射性物質を扱う仕事に携わる作業者が受ける放射線の量についても、国が規制して管理することを提案しています。鉱物や石など、どんな物にも大なり小なり天然の放射性物質が含まれています。それらの物から出る放射線の量が健康への影響を心配する必要のないごく微量の場合は問題ありませんが、場合によっては健康に影響が生ずる恐れのある、高い線量の場合でも、自然の物質ということで、これまでは気づかずに取り扱われてきたのが実情です。

わが国では、国の放射線審議会の基本部会という委員会で、これら自然の放射性物質の管理について検討され、報告書にまとめられました。現在日本で様々な産業で取り扱われているものや一般消費財に含まれて流通している自然放射性物質の現状について調査され、以下のものが問題となり得る物質として挙げられました。

モナザイト（健康用具、塗料、希土類）

リン鉱石（リン安、石膏、リン酸肥料）

チタン鉱石（酸化チタン、石膏）

バストネサイト（研磨材）

ジルコン（耐火物）

サマリウム（磁石）

石炭灰（フライアッシュ）

これらの物質が取り扱われる製造過程で作業者が受ける放射線の線量は、年間0.4ミリシーベルトを超えていないと評価され、また、これらの物質が含まれる一般消費財により公衆が受ける放射線の線量は、年間0.1ミリシーベルトを超えていないと評価されました。これらの現状を踏まえて、基本部会の報告書では、自然放射性物質を管理のしやすさや人為性の程度に基づいて、8つのカテゴリーに分けて、それぞれの管理の仕方を提案しました。この提案によると、庭石、博物館の岩石試料や工事現場で出てきた岩石など、管理することが難しいものについては、規制が及ばないものとして規制除外としています。また、工場などのタンクやパイプの内壁に沈着した残渣については、管理が難しいこともあり、それを見つけた場合に ある線量（1から10ミリシーベルト）を超えていないかどうかを確かめて、超えているなら除去するなどの処置をすることにしています。産業で用いる原材料やある行程で自然放射性物質が濃縮された残渣については、作業員が受ける放射線の線量が年間1ミリシーベルトを超えないように処置をして管理することにしています。一般消費財については、人工の放射性物質と同じように年間10マイクロシーベルト（1マイクロシーベルトは1ミリシーベルトの1000分の1）を超えないようにし、超えるような物は承認をとった物だけにしています。

上述の基本部会報告書の内容を受けて、文部科学省において研究炉等安全規制検討会でウラン・トリウムを含む物質の管理についてのガイドライン²⁾がまとめられて2009年6月に発行され、現在<http://www.norm-guideline.mext.go.jp/>からダウンロード可能です。本ガイドラインでは、対象事業者の特定から情報提供、記録までの実施内容を示しています。自然放射性物質から受ける放射線の防護は、制御可能な自然放射線源の利用により受ける放射線の線量をいかに低くするかが重要な課題ですが、その具体的な方法についても、現場ごとに異なることが予想され、専門家によるサポートのシステムを構築することも重要な課題であると考えられます。

自然放射性物質の管理については、世界でもまだ検討されている段階で、専門家での検討が今後進められます。

以上

引用文献

- 1) 放射線審議会基本部会、自然放射性物質の規制免除について、2003
- 2) 文部科学省、ウラン又はトリウムを含む原材料、製品等の安全確保に関するガイドライン、2009

2010年7月
日本原子力学会
原子力発電部会

原子力産業の海外展開について

【見 解】

原子力は、エネルギー供給源としての役割に加えて地球環境問題への貢献ということで、世界的に再認識されている。世界レベルで見ると将来にわたるエネルギー供給の逼迫問題および温暖化ガス排出量削減という、相反する問題への唯一の現実的解決手段として原子力が位置づけられている。

したがって、これから原子力の導入を目指している国々に対して、世界で最も低い原子炉の計画外運転停止率を誇るなど我が国の信頼性の高い原子力産業技術を海外展開することは世界全体のメリットになると考える。

加えて既に原子力発電を導入している諸国に対しても、前述の理由と同様に積極的な展開を図るべきものであると考える。

【学会としての取組む意義】

わが国の原子力産業の海外展開を進めるに当たり、これまでの政府間レベルおよび産業界レベルでの相手国との協力関係のみならず、大学・研究機関を含む学会レベルでの協力(交流)関係についても一層の充実も重要である。

学会レベルでの知の展開においては、相手国における原子力産業の安全性の確保に貢献すると共に原子力産業として特別に重要な意義を持つ核不拡散技術の積極的な提供も併せて行う必要がある。

【産官学連携の必要性】

上記に加え、今後原子力発電利用の導入を予定している国々を対象として、産官学の人的連携協力、特に各国の社会状況を考慮した人材育成の協力についても積極的に行うべきと認識している。具体的には、法令、行政機構、保安管理体制の構築などについては我が国が積極的に貢献できる領域であり、当学会としても活動を強化して原子力産業の海外展開に協力すべきものであると考える。

以上

ポジション・ステートメント(見解、提言(解説)、その他)

2018年8月
日本原子力学会
核融合工学部会

イーター(ITER)計画

はじめに

人類は、古代から大空に輝く太陽のエネルギーを利用してきました。この太陽を地上に作り、そこからエネルギー(核融合エネルギー)を取り出して利用することを目指した研究開発が世界中で行われています。核融合エネルギーは、現在私たちが直面している地球規模の課題、即ち、エネルギー問題と環境問題の両方を同時に解決できる可能性を持つ魅力あるエネルギー源として期待されています。

とはいえ、太陽で起っている核融合反応そのものを地上で実現することは困難なので、これとよく似た核融合反応を地上で実現するための、いわば地上に作る小型の太陽と類似の¹⁾エネルギー発生装置(これを核融合炉と呼びます)の開発を進めています。この核融合炉は、燃料に水素の同位体を用い、強力な磁場で燃料を閉じこめて核融合反応を起こそうというもので、地球温暖化の原因となる二酸化炭素を発生せず、安全性も高く、さらに燃料資源は無尽蔵であるという特徴を持っています。

核融合炉の研究開発では、現在、トカマク型と呼ばれる方式が、最も有望でかつ研究開発が進んでいます。このトカマク型の研究開発で、最先端を担っているのがイーター(ITER、ラテン語で「道」を意味します)です。我が国では、イーターを核融合研究開発における実験炉と位置づけ、多くの国々と協力して、その研究開発に参画することが、核融合エネルギーの実現に向けた、国の研究開発の指針となっています。イーターによって核融合エネルギーの科学的、技術的な有用性を実証した後、その次の開発ステップである発電実証プラント(原型炉)の段階を経て、今世紀中頃までに核融合エネルギーの実用化の見通しを得ることを目指しています。

以下に、イーター計画の背景と目的、計画実施の状況と我が国の貢献をご紹介します。

イーター計画の背景と目的

イーター計画は、1985年の米ソ首脳会談(当時、レーガン米国大統領、ゴルバチョフソ連共産党書記長)に端を発しています。両首脳は、冷戦終結の平和のシンボルとして、核融合エネルギー開発のため核融合炉の共同設計を行うことに合意しました。その後、日欧も加わり、1988年より、日本、米国、欧州、ソ連による共同の概念設計作業が開始されました。

この概念設計の後、1992年より、本格的に、イーター建設を目指した工学設計と、イーターの建設の鍵となる主要機器に関する技術開発が行われました。日米欧露の専門家で構成される国際チームが設計の取り纏めを行い、また、日米欧露が分担し

て技術開発や実規模の試作開発を行い、2001年までに、工学設計が取り纏められ、また、主要機器の技術開発もすべて成功裏に終了しました。これにより、イーターの建設に着手できるとの判断がなされました。

その後、新たな国々(韓国、中国、インド)のイーター計画への参加、イーター建設サイトの決定(南フランスのカダラッシュ)、イーター計画実施のための国際条約の批准を経て、2007年末より、イーターの建設活動が開始されました。

イーター計画は、大きく以下の3項目を目的として進められており、これによって、核融合エネルギーの科学的、技術的な有用性を実証することになります。

1. 実際の燃料で核融合による長時間燃焼(400秒程度)を実証する。また、出力エネルギーを入力エネルギーで割った比(Q 値)が10を超える核融合燃焼を目指す。
2. 核融合による燃焼に必要な工学技術を実証する。
3. 核融合反応で発生する核融合エネルギーを熱として取出す試験を行う。また、燃料である三重水素のリサイクルを行うための試験を行う。

イーター計画の実施の状況と我が国の貢献

イーター計画は、日米欧露韓中印が加盟する国際条約(イーター協定)の下に、その建設、運転、廃止措置が実施されます。イーター協定は35年間の期限の条約であり、イーターの実施主体であるイーター機構の設立、加盟国の権利・義務、各加盟国の国内機関を通じた貢献などが規定されています。イーター協定は、平成19年(2007年)10月24日に発効し、同日イーター機構(池田要機構長)が正式に発足しました。イーター計画は、イーター協定に加盟する国々の国際協力により実施される国際研究開発プロジェクトであり、現在の加盟国は、全世界の人口の半分以上を、また全世界の国民総生産(GDP)の3/4以上を占めており、正に全世界的なプロジェクトと云えます。

イーターの建設に必要な機器の約9割は、加盟国が機器を調達し、イーター建設サイトに納める物納機器が占めており、加盟国の国内機関を通じて行われます。我が国は量子科学技術研究開発機構を国内機関と指定し、同機構が産業界と協力して、イーターの主要機器であり、いわゆるハイテク機器でもある超伝導コイル、プラズマ加熱装置、遠隔保守装置、プラズマ対向機器、空気中トリチウム除去装置、プラズマ計測装置を調達します。また、これらの機器調達に関して、イーター機構を積極的に支援する役割も担っています。

さらに、国内機関は、イーター機構に邦人を派遣する窓口となり、イーター計画の円滑な実施に寄与する役割や、国内学会・産業界のイーターへの参加を促進し、我が国のイーター計画への貢献を高めると共に、広く成果を我が国に還元するため、核融合エネルギーフォーラム等の場を利用して、国内意見の集約を図る役割も担っています。

おわりに

我が国は、イーター計画に参加することにより、核融合炉の工学技術、核融合燃焼の制御のための技術・ノウハウを我が国に蓄積するとともに、人材の育成を行うことを目指しています。その上で、イーター計画を通して得られる人材・技術・ノウハウを活用して、核融合エネルギーの早期の実現を目指しています。私たち核融合工学部会は、このイーター計画を全面的に支援し、核融合研究開発の先進国として協力を惜しみません。イーター計画は、開始から35年にわたる長期的な研究開発活動であり、若い世代の参加が不可欠です。この場を借りて、若い世代の参加を呼びかけると共に、部会としても若い世代のイーターへの参加を全面的に支援していく所存です。

もっと知りたい方に

○イーター計画、装置、機器調達、日本の活動等に関する情報

①文部科学省ホームページ: http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/iter/main.htm

②量子科学技術研究開発機構 ITER ホームページ:

<http://www.fusion.qst.go.jp/ITER/>

③イーター機構ホームページ(英文): <http://www.iter.org>

○イーター協定の情報

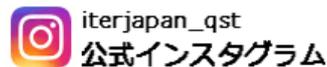
外務省ホームページ: http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/treaty/shomei_19.html

○核融合エネルギーフォーラムの情報

核融合エネルギーフォーラムホームページ:

<http://www.fusion.qst.go.jp/fusion-energy-forum/>

○量子科学技術研究開発機構 ITER の SNS



1) 質量数の小さい複数の原子核が集まり一つの原子核になる反応が核融合反応で、太陽では水素の原子核が集まり最終的にヘリウムになるのに対し、地上の核融合炉では重水素とトリチウムの原子核が反応し、ヘリウムと中性子に変わる反応を利用します。

「医療分野における加速器・ビーム利用」

平成 21 年 2 月

平成 27 年 12 月改訂

日本原子力学会

加速器・ビーム科学部会

放射線がん治療の技術進歩について

世界有数の長寿国となったわが国では、がんがその死因の第一となっています。近年がん治療には手術による外科治療，抗がん剤による化学治療，放射線治療があります。正常組織への損傷が少なく，抗がん剤による副作用もない放射線治療への期待が高まっています。今後 4 人に 1 人にがんが致命症となり，2 人に 1 人が放射線治療を受けると言われています。がん治療に使われる放射線は，X 線，電子線，陽子線，炭素線，中性子線などがあります。一般的に，人体の健全な臓器が大量の放射線を受けると致命的な損傷を受けますが，最近の放射線治療では大量の放射線がん細胞にだけ集中して照射する技術が進歩したため，健全な臓器の損傷を最小限にとどめ，がんの治療が行えるようになり，広範に普及するようになりました。

一般的に，放射線を吸収する線量の単位で，4 グレイ¹の放射線を人の健全な臓器が受けると 60 日以内に 50%の人が亡くなるという致命的損傷を生じるといわれています。放射線によるがん治療では，場合によっては数十グレイもの高い放射線量を使用することがありますが，がん細胞に集中させる技術が進歩したことにより，このような高い線量を使用しても安全に治療ができるようになり，がん治療に多大な貢献ができるようになりました。

粒子線治療の原理

人体が放射線を受けると，細胞の遺伝子が壊れ，正常な活動が阻害されます。つまり，放射線は人体にとっては基本的に有害です。その放射線がんのみ当てるようにして，健全な組織に当てないようにコントロールできれば，がん細胞のみを壊す，つまりがん治療することができるようになります。この技術について少し詳しく説明します。

人体に与える放射線の影響は放射線の種類によって異なります。放射線が直接遺伝子に衝突して原子分子レベルで組織を壊すことを直接効果といいます。また，放射線が生体中の水（ H_2O ）を分解して生成する，OH ラジカルという活性な分子が，化学反応で遺伝子を壊すことを間接効果といいます。陽子線や炭素線など重い粒子の放射線のことを粒子線といい，特に陽子よりも重い粒子を重粒子線と呼びます。X 線，電子線などの放射線は間接効果が支配的ですが，粒子線では直接効果の寄与が大きくなります。すなわち放射線の種類によって，人体へのエネルギー付与の分布が異なってきます。その様子を図 1 に示します。図 1 の縦軸は人体が吸収する放射線量

¹グレイとは，放射線に当たった物質が吸収するエネルギー量（吸収線量）を示す単位。1 グレイとは，物質 1 kg あたりに吸収された放射線のエネルギーが 1 ジュールであることをあらわす。

を示し、横軸は人体の皮膚からの深さを示しています。X線や電子線のエネルギーは基本的に人体の表層で多く吸収され、深くなると減衰していきます。これに対して、陽子線や炭素線などの粒子線は、エネルギーにもよりますが表層ではほとんど吸収されず、人体の特定の深さで集中してエネルギーを付与し、人体が吸収する線量はシャープなピーク²を形成します。照射する粒子線のエネルギーが高いほどそのピークも深くなります。図中に腫瘍の位置を矢印で示したように、このピークが丁度がんの位置にくるように粒子線のエネルギーを調整することにより、がん細胞にだけ集中的に放射線のエネルギーを吸収させることができます。したがって陽子線や炭素線などの重い粒子の放射線は人体の内部にあるがんの治療に適しています。図2に手術しにくいがんへの粒子線治療の結果の例を示します。

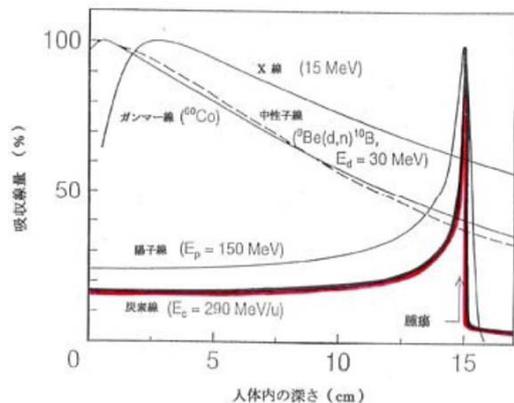


図1 放射線の種類による人体への影響の比較

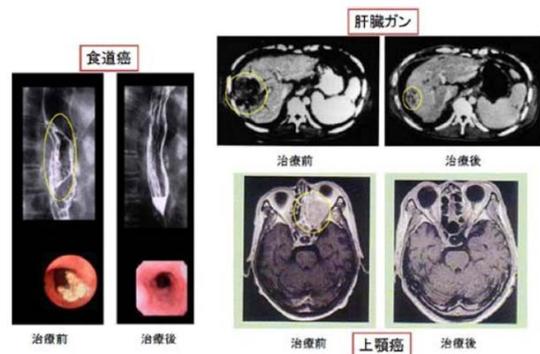


図2 粒子線による治療例

粒子線による放射線治療装置（シンクロトロン）

放射線治療の放射線は加速器で発生させます。加速器にもその形によって、直線で加速する、線形加速器（ライナック）の他、円周上で加速する、サイクロトロンやシンクロトロンと呼ばれる装置があります。陽子線によるがん治療にはシンクロトロンやサイクロトロンが、重粒子線の場合にはもっぱらシンクロトロンが使われます。その代表的な装置、放射線医学総合研究所の重粒子線（主に炭素線）加速用シンクロトロン（略称 HIMAC）の平面図を図3に示します。

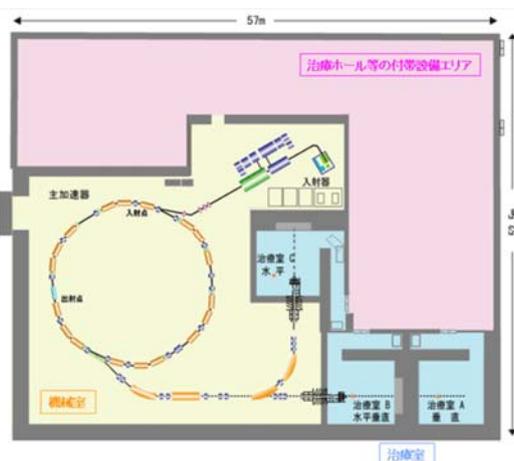


図3 重粒子線シンクロトロン HIMAC 平面図

² ブラッグ[Bragg]ピーク

この分野の我が国の技術レベルは世界のトップクラスで、平成 27 年 12 月現在、我が国では稼働中の粒子線がん治療施設が 14 ヶ所にあります。これらの施設では既に数多くの治療実績が上がっていて、年間約 5000 名のがん患者が治療を受けています。原子力技術は医療分野でも大きな社会貢献を果していると言えます。

X線による放射線治療装置（ライナック）

X線による放射線治療にはライナックと呼ばれる線形加速器が使われています。がん治療用のX線ライナックは、現在、世界に1万台以上、日本に1千台近く普及しています。その外観と構造を図4に示します。赤い筒が加速管と呼ばれる機器で、ここでX線を発生します。その下流にマイクロリーフコリメータという自動位置決め装置があり、X線をがんの位置に正確に合わせて照射できるようになっています。予めコンピュータ断層撮影（CT；Computerized Tomography）でがんの位置を正確に確認した上で、治療計画をたて、複数の方向から異なる形のX線を照射して、がんの細胞に最大のエネルギーが吸収されるようにして、深部がんの治療を可能にしています³。

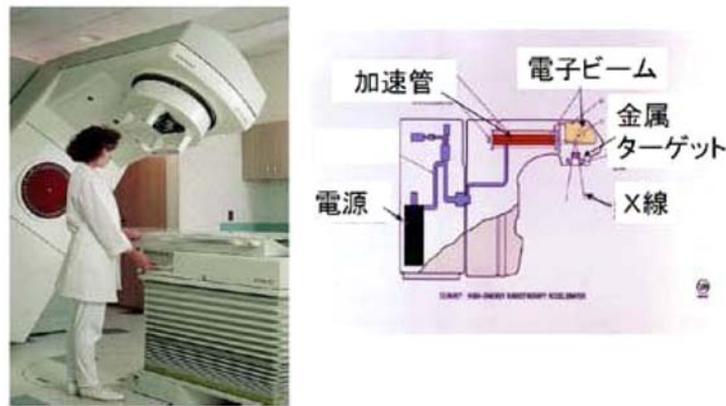


図4 がん治療用のライナック

ホウ素中性子捕捉治療（BNCT）法

予めがん細胞にのみ ^{10}B （ホウ素 10）を吸収させておき、これを熱中性子で照射すると、 $^{10}\text{B} + \text{n}$ （中性子） \rightarrow ^7Li （リチウム 7 原子核） $+$ α （アルファ線）という原子核反応が生じます。発生した数 MeV のアルファ線や ^7Li ががん細胞の DNA を破壊します。これらの高エネルギー粒子が体内で飛ぶ距離は 10 ミクロン程度であり、これは人間の細胞の大きさとほぼ同じであるため、がん細胞の核だけを破壊し、隣の正常な細胞にはダメージを与えないので、がん細胞だけを選択的に殺すことができます。この方法を BNCT（Boron Neutron Capture Therapy；ホウ素中性子捕捉治療法）と呼びます。正常細胞への影響が小さく、京都大学研究用原子炉 KUR や日本原子力研究開発機構の研究炉 JRR-4 で優れた治療成績が得られています。特に熱中性子よりも少々エネルギーの高い「熱外中性子」を利用することによって深部がんも開腹や開頭手術をしないで治療できるようになり、症例数が増加しています。今後ガントリーなどを使った多方向照射など、さらなる治療法の改善や最適化によって深部がんの治療成績がより向上すると期待されます。

³ 強度変調放射線治療（IMRT）という

注目すべきことは、BNCT 法では治療時に ^{10}B を吸収していない正常細胞には 10 グレイ程度の影響しか与えずに、正常組織内に浸潤した浸潤がんや、臓器に多く発生した多発がんなどの難治がんに対して治療効果が期待できるということです。今後、より良い ^{10}B 含有薬剤の開発ともあいまって、より広範な治療が期待されます。特に最初のがん治療で X線などの放射線治療を受けた後のがんが再発した患者に対しても、BNCT であれば前の治療で 50~70 グレイの高線量を付与された部位に対しても再照射が可能となり、再発がんに対する治療法としても期待されています。また、皮膚がんについては、深部細胞に殆ど影響を与える事なく治療できます。

ただし、この治療法はまだあまり普及しておらず、その理由のひとつは、これまで原子炉でしかできなかったためです。原子炉よりも小型の加速器で適切な量・質の中性子を発生できれば、病院での治療も可能になります。現在、京都大学原子炉実験所でメーカーが小型サイクロトロンを用いた中性子源を開発中であり、また他の方式の加速器を用いた開発研究も進行中です。なお、BNCT は粒子線治療用の加速器に比べて比較的小型の加速器で実現可能であるため、治療費は粒子線治療よりも低く抑えられると見込まれています。

放射線診断技術

放射線による診断技術も著しく進歩しています。最近、最も普及している診断装置は、X線 CT です。図 5 にその外観を示します。この装置では小型の X線発生装置と検出器が患者さんの体の周りをらせん状に回転して、内部構造の 3次元画像を作成します。最新の装置では回転とデータ処理が高速化し、秒単位で動く肺がんなどの動画像が得られるようになっています。これは 4次元 CT と呼ばれています。もうひとつ、最近注目されている新しい診断技術に陽電子放出トモグラフィ (PET ; Positron Emission Tomography)があります。これは陽電子 (ポジトロン) と呼ばれる放射線を発する放射性同位元素をブドウ糖に組み込んで患者さんに投与し、それを新陳代謝の活発ながん細胞に集中させます。そこで発生するポジトロンが生体中の電子と結合して出す、二つのガンマ線を検出器で測定して、がんの形を画像化するものです。PET で検出された 5 mm のがんの画像の一例を図 5 に示します。最近では X線 CT と PET を組み合わせた PET-CT という豪華な装置も開発されています (図 6)。なお、ポジトロンを放出する放射性同位元素は、サイクロトロンからのイオンビームを使って製造されています。



図 5 X線 CT 装置

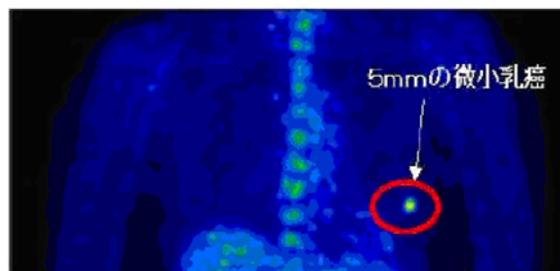


図 6 PET によるがんの画像例

医学物理について

ここまでご説明した放射線医療の科学技術は、新しい「医学物理」という分野を形成していま

す。医学物理は科学技術のみでなく、臨床現場での治療計画、治療の品質保証、安全管理等も含まれます。この業務を専門的に担う職種を医学物理士と呼びます。欧米では多くの医学物理士が臨床現場で活躍し、また研究機関・企業と連携して新科学技術の開発も行っています。アメリカではその数は 5 千人を超えています。日本では優秀な診療放射線技師が多数、臨床現場にて重要業務を担っていますが、欧米における医学物理士の役割までは与えられていません。日本の医学物理士はまだ 900 名程度です（認定医学物理士：861 名 2015.5.31 時点）。

アメリカでは約 40 年掛けて、医学物理の科学技術が自主開発され、その普及とともに医学物理士の人口も増えてきました。我が国における放射線医療をさらに発展させるには、医学物理分野の科学技術開発の発展が不可欠です。医療現場に医学物理士のような物理・工学に長けた人材が参入するよって、高度な医療器械、装置は真に医療側にとって使いやすいものとなります。X 線発生用の小型線形加速器、MRI を始め、日本発の医療装置は、かつて全世界を席卷していましたが、医療制度の制約もあってその後の開発に遅れをとり、欧米による改良品にとって替わられて来ています。この意味でも医学物理士の活躍が大いに期待されます。本学会でも関連の多くの科学技術成果が報告され議論されています。これらの成果が様々な形で、放射線医療に貢献できることを期待しています。

以上

ポジション・ステートメント（見解，提言，解説，その他）

「原子力安全国際シンポジウム（I S O N S 2 0 1 1）声明」

2013年8月
日本原子力学会
社会環境部会

2011年11月1日に日本保全学会と共催で開催した原子力安全国際シンポジウム（I S O N S 2 0 1 1）で当学会長が日本保全学会長と共同で発表した共同宣言を広く社会に向けて発信するため前文を含めて以下の通りポジションステートメントに登録する。

前文

2011年3月11日は、原子力発電の歴史において忘れてはいけぬ日になった。東北地方太平洋沖地震の津波により東京電力福島第一原子力発電所が被災し、1号機から4号機が未曾有の原子力災害を引き起こすに至った。

これまで日本原子力学会は、福島第一原子力発電所の事故に関して、事態の分析や原因の解明、また社会への分かり易い説明、事故の収束を助ける技術活動、さらには発電所周辺地域の環境修復に向けた様々な支援活動をボランティアに進めてきた。また、日本保全学会は、津波で被災した発電所の復旧に関する事後保全や予防保全である津波対策評価ガイドラインの策定などを進めてきた。

原子力エネルギーは、エネルギーセキュリティーや地球温暖化防止といった問題解決の重要なエネルギー源として利用されてきた。それとともに、原子力災害を起こさないようにするための活動も行ってきたにも拘らず、今回巨大津波により原子力災害に至ったことは、原子力に携るすべての者にとって大きな衝撃であり、なぜ防止できなかったのか、何が足りなかったのかなどについて、背景要因を含め、さまざまな観点から分析する必要がある。

本シンポジウムでは、学会の活動だけではなく、世界各国での原子力安全に関する様々な活動を国際機関や原子力産業界の立場から報告していただいた。これは学会、産業界の立場を超えて、原子力安全を考える場としたいという思いからである。日本原子力学会および日本保全学会は、二度とこのような原子力災害を起こしてはならないとの強い決意のもと、シンポジウムでの検討を踏まえ、共同宣言を発表する。

共同宣言

我々は、本国際シンポジウムに参加いただいた学協会および世界の諸機関のご指摘とアドバイスを基に、明らかになった事実を尊重し、高い倫理観のもとで、公平・公正かつ透明な議論を行い、社会に対して信頼できる正確な情報の発信と、具体的活動に自ら取り組む。我々は、二度とこのような事故を起こさないために、学術的専門家集団として、東京電力福島第一原子力発電所の事故を真摯に反省して教訓を抽出し、これからの原子力安全の確保に最大限貢献することこそ重要な役割であると認識する。

我々は、事故から得られた知見の整理・分析を通じて、導き出された教訓を基に、各機関

や行政組織の施策に適切に反映すべく提言や学術的、技術的な支援を積極的に行い、世界で運転されている多くの原子力発電所の安全性をより確実なものとすることに貢献する。

我々は地域社会や日本の復興に向けた技術的なサポートを継続し、信頼回復に努める。

我々は、真理を探求する学術的な立場に立脚しつつ、より高い安全性を目指した原子力安全基準の策定や安全研究など国際的な原子力安全に向けての諸活動に積極的に参画し、世界の原子力発電所が科学的・合理的な管理のもとで安全性を確保することに貢献する。

我々は、以上の活動により、原子力発電に対する安全を追求し、地球環境保全と人類のエネルギーの確保に貢献することを、ここに宣言する。

2011 年 11 月 1 日

日本原子力学会 会長 田中 知

日本保全学会 会長 宮 健三

ポジションステートメント（見解、提言、**解説**、その他）
「ガラス固化技術」

2013年9月
日本原子力学会
再処理・リサイクル部会

【はじめに】

ガラス固化とは、再処理工場から発生する高レベル及び一部の低レベルの放射性廃液を、化学的に安定な状態として長期間に亘り安全に保管・処分できるように、ガラスに溶融し、金属製の容器（キャニスター）に封入・固化する処理方法です。

日本における初の商業用再処理施設である六ヶ所再処理工場では、2006年3月より、原子力発電所から発生した使用済燃料による総合試験（アクティブ試験）が開始され、工場の主目的であるプルトニウムやウランの回収は問題なく進んで来ましたが、最後の工程の高レベル放射性廃液の「ガラス固化試験」で足踏みをしています。しかしながら、それを乗り越える新たな取り組みが始まっています。

【日本のガラス固化技術の開発と六ヶ所再処理工場への導入】

日本のガラス固化技術の開発は、主に日本原子力研究開発機構（原子力機構）により進められてきました。原子力機構では、茨城県東海村の再処理施設において、1994年9月から1号炉のホット試験が開始され、白金族を含むガラスの抜き出し性を改善するための底部電極構造変更等の改良を加えた2号炉で、2004年9月から開発運転が行われてきました。この間、運転経験を踏まえ、より安定的に運転を継続するため、白金族対策の他、廃ガス配管洗浄技術、ガラス全量抜き出し（ドレンアウト）後炉内残留ガラス除去技術等の開発も行われてきました。

六ヶ所再処理工場のメインプロセスは、フランスから技術導入されたものですが、このガラス固化技術は、純粋な国産技術です。六ヶ所再処理工場のガラス溶融炉は、原子力機構の溶融炉がスケールアップされたものであり、原子力機構やメーカーの協力を得て、建設、試験運転、保守等が実施されてきました。

【六ヶ所再処理工場ガラス溶融炉のトラブル経験と克服】

六ヶ所再処理工場のガラス溶融炉は、次のようなトラブルが発生しました。

- ・白金族の堆積による溶融ガラスの流下性低下
- ・流下ノズル閉塞
- ・炉内攪拌棒の曲がり
- ・天井レンガの落下
- ・低粘性流体（イエローフェーズ）の生成

これらのトラブルのうち、流下性低下の原因とその対策を検討するため、日本原燃が中心となり、六ヶ所再処理工場のガラス熔融炉と同じ大きさのモックアップ装置（KMOC：東海村に設置）を用いて各種試験調査を実施し、安定運転に必要な技術や条件について検討されてきました。

この結果、炉内の温度をより正確に把握して、適切にガラス熔融炉の温度管理を行う等の対応の重要性が確認され、六ヶ所再処理工場のガラス熔融炉に新たな温度計を追加しました。

【ガラス熔融炉高度化研究】

日本原燃では、より信頼性が高く効率的なガラス固化技術を開発するため、国の補助金も得て、2009年度から高度化研究を開始しています。この高度化研究には、日本原燃が中心となり、メーカー、原子力機構、国内の多くの大学、研究機関が参加し、オールジャパンの技術を集結して研究開発が進められています。現在、六ヶ所再処理工場に設置予定の次期熔融炉につながる成果が着々と積み上げられているところです

【海外のガラス熔融炉】

海外においても、再処理工場から発生した高レベル放射性廃液はガラス固化することとされており、フランス等の一部の国において商業用ガラス固化施設が稼働しています。高レベル放射性廃液をガラス中に熔融固化する基本的原理は各国共通ですが、熔融方式は国により異なります。

最も実績があるのはフランスです。フランスは、高周波電磁誘導加熱方式による金属製熔融炉を用いた方式です。日本の直接通電ジュール加熱熔融炉とは異なる熔融方式ですが、現在までに18,000本以上のガラス固化体を製造しています。イギリスにおいては、フランスから高周波電磁誘導加熱方式の技術を導入しました。この高周波電磁誘導加熱による金属製熔融炉方式には、炉の安定性が高く制御が容易である等の利点がありますが、高レベル放射性廃液を前もって蒸発乾燥し、仮焼して粉末にする仮焼装置（カルサイナー）が必要で工程が複雑になる、炉の大型化が難しい、炉の寿命が短い等の課題もあります。

日本と同じ直接通電ジュール加熱式を採用しているアメリカは、軍用再処理によって発生した廃液の処理が中心であり、処理する廃液の組成が日本と違います。

ドイツの技術は日本の技術に最も近いものですが、再処理実証試験が終了した後に、10数年・30年間貯蔵されていた高レベル廃液をガラス固化する目的であったため、六ヶ所ガラス固化施設のような商用施設ではありません。なお、ドイツでは既にこの廃液についてガラス固化が終了しています。

フランスやロシアで開発されているコールドクルーシブル誘導加熱炉（CCIM）は、ガラスを高周波誘導で直接加熱する一方で、ガラス熔融炉の炉壁を冷却することで、炉の劣化を防ぎ長寿命化を図るものです。また、熔融温度を高く出来ることから様々な廃棄物

の溶融やガラス固化体の廃棄物含有量を高めることも可能であり、開発段階を経て実機への導入が始まりつつあります。

【おわりに】

上記のとおり、六ヶ所再処理工場は最後の工程の「ガラス固化試験」で数々のトラブルに見舞われましたが、国内の諸機関の協力のもと実施された研究や試験等で、新たな知見が蓄積され、安定運転が期待されています。また、次期溶融炉の開発・設計も進められています。

今後も、さらに基礎物性研究も含めたガラス固化に関する研究開発が、研究者を育成しつつ国内技術を結集して継続的に行われ高性能なガラス固化技術を実現していくこと、そして、より高品質で高性能なガラス固化体を製造すること、これにより安定的にガラス固化体製造実績が積み重ねられていくことが望まれます。原子力学会では春の年会、秋の大会などでの研究成果の発表、議論を通じて、我が国のガラス固化技術の蓄積を支援しています。

なお、日本原子力学会再処理・リサイクル部会では、2011年1月「ガラス固化技術の現状と今後」と題したセミナーを開催しました。国内から200名以上の技術者・研究者が集うとともに、活発な質疑や意見交換が行われました。

本ポジションステートメントは、このセミナーにおける発表、意見交換も参考に纏めたものです。

以上

医療分野での放射線利用、これにともなう被ばくと放射線防護について

(はじめに)

近年、診断、治療等、医療分野での放射線利用は目覚ましい。放射線を用いた診断や治療の最も大きな利点は、人のカラダにメスを入れることなく診断、治療が可能であるため、患者への負担が小さいということである。また、このため、疾患の早期発見等にも大いに役立っている。一方、わが国は放射線を利用した検査装置の数、受診回数ともに高く、放射線発生装置の線量低減のための努力が進められているものの、一人当たりの医療被ばくは世界平均に比べて約4倍高い。このため、これまでも医療被ばくによって受けた線量の健康影響については議論の的となってきた。そこで、最近の医療分野での放射線利用、医療被ばくの現状及びその防護の考え方についてとりまとめる。

(診断・手法)

放射線による診断は、一般的な健康診断でも数多く利用されている。最近では、胸部単純X線撮影装置による検査だけでなく、臓器の3次元画像化が可能なCT(コンピュータ断層撮影)検査、乳房のがんの診断にはマンモグラフィCT検査が行われている。最大320列の検出器を兼ね備えたマルチスライスCT(MDCT)も登場しており、人体の幅160mmの範囲を1回転0.35秒という短時間で撮影するため、心臓等、動きを止めることのできない臓器を撮影することができるようになった。被ばく線量は、検査によって異なるものの、この320列MDCTによる冠動脈造影にかかるスキャン時間は現在の一般的な64列MDCTの3分の1となり、患者の被ばく線量は3割低減されたといわれている¹⁾。そして、PET(ポジトロン断層撮影)、SPECT(単一光子放射断層撮影)といった核医学検査も盛んになってきた。

(診断・件数/頻度)

原子放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR)2008年レポート²⁾では、1997年から2007年の10年間においては、医療に関する技術レベル(ヘルスケアレベル)が最も高いレベルIの国々(わが国も含まれる)では、通常の医療診断での放射線利用は、年間1000人当たり1332件、歯科利用が275件と報告されている。一方、レベルIIの国々では、通常の診断利用が332件、歯科利用が16件、レベルIII及びIVの国々ではそれぞれ20件と3件となっている。世界平均としては、通常の診断利用が1000人当たり488件、歯科利用が74件となっている。国の社会経済、医療の普及レベル等の違いにより、放射線を利用した診断件数は大きく異なる。世界的に、放射線を利用した診断件数は、ヘルスケアレベルの向上により近年増加しており、これまで診断件数の少なかった地域において、件数が増加すると、今後も世界的に診断による医療被ばく線量が高まる可能性がある。わが国の放射線を利用した診断については、マルチスライスCTの台数が5960台、他のCTが6040台、マンモグラフィが3792台、PET、PET/CT、SPECTがそれぞれ199、267、1337台(平成20年)となっている。UNSCEARによると、日本

の人口あたりの CT 保有台数は、調査の中で最も保有台数が少なかったメキシコと比較して約 60 倍、2 番目に CT を多く所有しているオーストラリアと比較しても約 2 倍、アメリカの約 3 倍となっており、医療先進国の中でも格段に一人当たりの CT 保有台数が多い。

(診断・線量)

個人が診断によって受ける線量(治療を除く)の世界の平均的な値は現在年あたり 0.6mSv である²⁾。これは、一般公衆が 1 年間に自然放射線源から受ける線量(2.4mSv)について、大きな値である。さらに、ヘルスケアレベル I のいくつかの国では、1997 年から 2007 年の間に、歴史上はじめて、診断による集積線量が自然放射線源から受ける被ばく線量を上回る結果となった。ヘルスケアレベル別に一人当たりの線量を示すと、レベル I の国々の医療診断による実効線量は 1.91mSv、歯科診断では 0.0064mSv、レベル II の国々の医療診断では 0.32mSv、歯科診断では 0.0004mSv、レベル III 及び IV の国々では、医療診断が 0.03mSv、歯科診断が 5.1×10^{-5} mSv となっている。わが国の CT の年間診断件数と集団線量から、国民一人当たりの年間被ばく線量を算出すると、1989 年には 0.8mSv であったが、2000 年には、CT の保有台数が約 2 倍となったこととともない診断件数も約 3 倍に増加、この結果、線量も約 3 倍に増加して 2.3mSv となっている²⁾。

個々の診断に対する線量は、国際放射線防護委員会(ICRP)が 2007 年に発刊した Publication 102 によると、シングルスライス CT またはマルチスライス CT による 1 回あたりの撮影は実効線量で 2 から 20mSv となる³⁾。特に、骨盤を含む腹部の場合、照射部位も広く最も線量が高くなる。1997 年から 2007 年のヘルスケアレベル I の国々における 1 検査当たりの胸部 X 線撮影、腹部 C 線撮影、マンモグラフィ、CT 検査、血管造影の平均実効線量は、0.07、0.82、0.26、7.4 及び 9.3mSv となり、血管造影による線量が最も高く、次いで CT 検査となっている。2006 年の米国の年平均実効線量は、自然放射線 3.1mSv に対し、CT 検査が 1.5mSv、核医学利用が 0.8mSv、心臓診断が 0.3mSv と報告されている²⁾。診断とは異なるが、CT 画像等による誘導のもと、体内にカテーテルを挿入して治療を行うインターベンショナル・ラジオロジー(IVR)は 0.4mSv と報告されている。これは、一般的な胸部 CT 撮影より撮像時間が長いいため、被ばく線量が高くなるためである。

(治療・手法)

放射線利用した治療としては、Co-60 γ 線を利用した遠隔治療や脳腫瘍や脳血管の奇形などの治療に用いられ、病変の部分に集中的に放射線を照射するガンマナイフ、直線加速器を利用して病巣に電子線や中性子線を照射する方法、また、前立腺がんなどに用いられる I-125 や Ir-129 の小密封線源を体内に挿入する治療等がある。また、照射した放射線の線量が体内深部で高くなり、手術が難しい場所や深部にある腫瘍を集中的に攻撃できる陽子線治療や重粒子線治療法等が最近、注目されている。さらに、ホウ素中性子補足療法(BNCT)は、腫瘍細胞内にホウ素を取り込ませ、体外から熱中性子または熱外中性子を照射することにより、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 核反応により α 線と Li 反跳核を発生させ、腫瘍細胞を破壊する⁴⁾。この治療法は、発生する荷電粒子は飛程が細胞径を超えないため、正常細胞をほとんど傷つけることなく、腫瘍細胞のみにダメージを与えることができる。中性子源として、原子炉を利用するが、加速器を用いる方法も開発されている。

(治療・線量)

放射線治療の目的は腫瘍等の標的組織を根絶する、または患者の症状を緩和することである。このため、治療で受ける放射線量は診断に比べ、非常に高くなる。病巣周辺の局所的な被ばくとなるが、1回に照射する線量は数十 Gy^{注)}となる⁵⁾。例えば、小児の脳腫瘍のうち、もっとも発生頻度が高い髄芽腫の場合、全脳脊髄に30-35Gy、後頭蓋窩に20Gy程度照射する。舌がんの場合、前立腺がん治療と同様に、小線源を組織内に挿入して照射するが、この線量は65-70Gyである⁵⁾。このため、病巣周辺の正常組織にやけどに相当するような確定的影響が発生する。したがって、放射線治療においては腫瘍に線量を与えることだけでなく、腫瘍周囲の正常組織の防護の計画も最適化に含まれる。

注) 治療のために照射する線量は、病巣周辺の局所の線量を吸収線量で表すことが多く、その場合の単位は Gy(グレイ)を用いる。治療の被ばくにより起こる二次がんなどに対する放射線防護のための線量としては、実効線量(Sv)が用いられるが、その場合は病巣部周辺で照射野に入ってしまった部分や病巣部での散乱などによって受ける全身の正常組織での線量を評価することになり、それらは、ほとんどの場合照射する線量と比べて、非常に低いと考えられる。

(治療・事故)

放射線治療での事故的な被ばくについては、ICRP Publ. 86、87、112 等に、過去の経験とその予防としてまとめている⁶⁻⁹⁾。各国において Co-60 照射装置の更新に伴う減衰補正ミスや前立腺がん治療時の線源確認ミス等による過剰被ばくによる組織の炎症等の早期障害、組織の壊死等の晩発性障害、死亡事故が起こっている。このような医療事故の教訓として、誤操作を防ぐための安全装置等の取り付け等、これまでに技術面ではさまざまな改善がなされている。

わが国では、最近、腎臓の機能をみるための腎動態シンチグラフィや腎臓の位置や大きさをみるための腎静態シンチグラフィの検査に使用する放射性医薬品(Tc-99)の過剰投与が報告された¹⁰⁾。通常の小児に対する投与量の5倍以上、最も投与量の多かった患者で通常の40倍であった。このような過剰投与が起きた原因は、検査時間が長く、患者が小児の場合、撮影時に動いてしまい画像が不鮮明になることから短時間で撮影するためであった。また、医師は投与量を確認していなかったといった問題もあった。幸い、現時点では、過剰投与と推測される患者に急性障害や発がん等の影響は出ていない。関連学会は、これまでも核医学検査の安全確保の観点から「核医学事故防止指針」や「放射性医薬品取り扱いガイドライン」等を作成、広く開示していたが、今後、医療における放射線利用の適性利用にむけて一層努力するとの声明を出している¹¹⁾。このほか、医療放射線利用における従事者の被ばく事故としては、血管造影作業時の医療従事者の過剰被ばくや放射線発生装置据え付け調整時に天井裏にいる別の作業員に気付かず、装置据え付け者がX線を発生させたために天井裏の作業員が被ばくする等が報告されている¹²⁾。

(医療被ばくの正当化・最適化)

診断・治療による被ばく(医療被ばく)の特徴は、意図的に実施するものであり、患者にとっては直接的な便益となることである。また、医療被ばくが職業被ばくや公衆被ばくと異なる点は、線量限度が設けられていないことである。患者への線量を制限することは、診断のための画像に影響を与える可能性が

ある、十分な治療効果が得られないといったような、患者にとって損害よりも多くの利益を得ることができないといったことになってしまうかもしれない。しかし、いくら良い画像が撮影できたとしても、より低い線量で同等の効果が得られるなら、不必要な被ばくは避けるべきである。

ICRP が掲げる防護の目的は、第一に人の健康を防護することである¹³⁾。そのためには、確定的(やけどのような組織反応)を防止し、がん、遺伝的影響といった確率的影響を合理的に達成できる程度に低減する必要がある。この目的を達成するための方針としての放射線防護の3つの基本原則としては、「正当化」、「防護の最適化」及び「線量限度の適用」を挙げている。「正当化」と「最適化」については、医療被ばくを含むすべての被ばく状況に適用されるが、線量限度の適用に関しては、医療被ばくは除かれる。また、「正当化」や「防護の最適化」についてもその適用については医療被ばくと、職業被ばく、公衆被ばくでは考え方が異なる。このため、ICRP は、医療被ばくへの基本勧告の適用には別のガイダンスが必要であるとして、放射線防護と医学の放射線利用の安全については Publication 73 に示した¹⁴⁾。この考え方は、最新の ICRP 基本勧告にも引き継がれている。

(正当化の意味)

ICRP は医療被ばくの正当化については、3つのレベルが適用されるとしている^{13,14)}。レベル1は「患者に被ばくによる害よりも便益を多く与える場合に受け入れられること。」、レベル2は「特定の目的を持つ特定の手法が明確にされ、これが正当化されること。」である。レベル3は、「患者ひとりひとりに異なる放射線の利用方法が適用されるが、この適用が正当化されること。」。それゆえ、「すべての個人の医療被ばくは、個人の特徴や被ばくの目的を考慮して、あらかじめ正当化されるべきである。」としている。

(最適化と診断参考レベル)

ICRP は最適化の観点から診断とIVRによる被ばくについては、診断参考レベルを用いることを勧告している¹³⁻¹⁵⁾。国際原子力機関(IAEA)では、1992年に発行した国際基本安全基準(BSS)において診断やIVRに対する具体的なガイダンスレベルを提示した^{16, 17)}。このガイダンスレベルは、例えば、頭部単純X線撮影(正面)で5mGy、胸椎(側面)20mGy、腰椎(側面)30mGy、骨盤(正面)で10mGy等となっている。2011年にBSSの改定版を発行したが、その中で、ガイダンスレベルの具体的な値を示さず、診断参考レベルは、国や地域での現状に適切な値を設定することとして、国や地域で線量の分布を調査して設定することとしている。わが国では、2006年に日本放射線技師会が医療被ばくガイドラインを提示しており、単純X線撮影に加え、注腸検査、血管造影等についても値が記載されており、IAEAのガイダンスレベルよりも低い目標値が与えられている¹⁸⁾。

(医療放射線による被ばくと発がん)

X線診断による発がんの可能性に関しては、2004年にLANCET誌にGonzalezらが、15カ国において調査した結果を発表した¹⁹⁾。この論文では、わが国のX線診断の頻度は最も高く、X線診断時の線量から、しきい値なし直線モデルにより発がん率を算定した場合、がん患者全体の3.2%(年間7587例の発がんに相当)に相当すると報告され、当時、全国紙でも取り上げられて話題となった。また、最近、週刊誌等にも、「医療の常識を疑え」として、上記英国の研究成果を取り上げ、「CT検査でがんになる。『発がん性の有無を(担当医に)尋ねて、「CT一回では発がん性は心配ない」という答えも論外で、やはり帰宅

すべき』といった記事が掲載された²⁰⁾。UNSCEAR2008 年レポートにも記載されているとおり、事実、わが国の国民あたりの医療被ばく線量は、諸外国に比べて高い。しかし、診断によるわが国の医療被ばくは年間で平均 2.3mSv であり、線量としては非常に低く、100mSv を下回るような低線量・低線量率での被ばくに対して健康影響が現われるかどうかについては慎重に取り扱う必要がある。ICRP は、放射線防護の観点から、100mSv を下回る放射線量について、がんのような確率的影響のリスクを管理するためには、しきい値なし直線(LNT)モデルが、最も良い実用的アプローチであり、「予防原則」にふさわしいとしている。一方、低線量においては不確実性が大きく、このモデルの根拠となっている仮説を明確に実証する生物学的・疫学的知見はすぐに得られそうにないともいっている。わが国の人口の約 30%ががんで死亡していることを考えると、がん患者のうちの 3.2%が医療被ばくに起因するとしても、個人の習慣の違い等によって不確かさは大きく、放射線による被ばくで高められたものがどうかを明確に区別することはできないだろう。注意すべきは、LNT モデルは、放射線防護のために便宜的に使用するものであり、X 線診断のような低線量の被ばくに対しての発がん率増加の議論に使用することができないということである。また、わが国において、一般的な X 線診断や CT 検査、核医学検査により、がんや遺伝的影響が現われたといった報告はなされていない¹⁰⁾。

(妊娠と放射線)

妊娠した女性に対する放射線被ばくをとともう診断・治療は、母体の健康状態と胎児への影響を勘案して注意して行う必要がある²¹⁾。胎児が 500 から 1000mGy 被ばくした場合、着床前期ならば流産、器官形成期(4 週から 4 か月)ならば奇形、胎児成長期(5 か月から出産)ならば成長障害、精神遅滞(精神遅滞は 25 週まで)といった確定的影響が発生する。また、全期間において、胎児の被ばくは、がん、遺伝的影響といった確率的影響の発生を増加させる。しかしながら、胎児が受ける被ばく線量が 100mGy 以下の場合、奇形の自然発生確率を上昇させることなく、発がん率も低い。また、自然に起こる流産や奇形が発生するレベルに比べても十分に低い。胎児への被ばく線量が高くなると考えられる骨盤 CT 撮影でも 1 回数十 mGy、一般的な X 線診断で受ける被ばく線量は 1mGy 以下である。したがって、診断により受けた線量レベルでは、放射線による胎児の放射線影響を区別することは難しいだろう。しかし、妊娠している女性の医療被ばくは可能な限り避けるべきである。母体を優先して治療や IVR 等で、1 回の被ばく線量が 100mGy を超える場合には、胎児を照射野から避け、可能な限り胎児の被ばく線量を低くする等、十分な配慮が必要である。さらに、内部被ばくを伴う核医学検査や放射線治療の場合には、胎児への影響に加え、乳児への授乳も控える必要がある。

(介助者、介護者、医学研究志願者の被ばく)

ICRP は 2007 年勧告にも明記している通り、診断、IVR 及び放射線治療により患者が受ける被ばくを医療被ばくに区分するとともに、これらの患者を支援・介護する家族、生物医学的研究への志願者が受ける被ばく等についても、医療被ばくに区分している¹³⁾。このため、このような人々には職業被ばくや公衆被ばくのような線量限度は適用されない。しかし、これらの人々が過剰な被ばくを受けることのないよう、その予測線量の上限の値として、線量拘束値を用いることが有効であるとしている。例えば、生物医学研究志願者のような社会への利益が少ない場合には 0.1mSv 以下、それほど大きくない場合は 1-10 mSv、大きい場合は 10mSv 以上、介護や付き添いに対しては、1 事象につき 5mSv とするよう勧告して

いる。

(まとめと結論)

医療分野における放射線利用は、診断、治療において重要な役割を果たしてきた。放射線を利用する以外にも MRI(核磁気共鳴画像)装置や超音波診断装置等があるが、撮影時間や撮影部位等にそれぞれの方法に得意・不得意分野があることから、今後も放射線は医療分野において、痛みや手術を伴わない診断・治療の有用な手段として利用され続けるであろう。

患者等の医療被ばくに対する放射線防護の観点からは、医療被ばくについても、職業人や公衆の被ばくと同様に、放射線被ばくの状況を変化させるいかなる決定も害より便益を大きくすべきであるといった正当化、また、個人の線量を合理的に達可能な限り低減すべきであるといった最適化の原則が適用されることは紛れもない事実である。医療被ばくの最適化に関しては参考レベルの使用が有効であり、ICRP は患者の線量を医療目的とバランスがとれるように管理するための手段であるとしている。国際的、国内的にも、個々の診断に対して診断参考レベルやガイダンスレベル等が設定されており、わが国においては国際的に設定された基準よりも低いレベルで運用するなど医療被ばく低減の意識は高い。

今後、診断・治療件数や診断撮影枚数の増加、撮影範囲の拡大等により、線量の増加が懸念されるが、これまでの放射線を利用した診断、治療技術の進展を考えると、放射線発生源や照射野を決定するコリメータの改良、放射線検出部の高精度化に加え、画像解析技術や再構築技術の開発等により、線量低減の余地があるだろう。また、診断・治療の手技によっても線量が異なり、線量低減の観点からの術者の指導・育成によっても患者の被ばく線量の低減が期待できる。

ICRP は放射線防護の観点から線量と影響の関係を LNT モデルを用いて推定することを推奨している。一方、最も良い実用的アプローチ、「予防原則」といったことを強調しており、低線量においては生物学的・疫学的な知見から人の健康影響に関しては明確になっていない。このため、特に LNT モデルを低線量の被ばくの健康影響の推定に使用する場合には、結果の解釈を慎重に行う必要があるだろう。

また、このような事実をインフォームドコンセントの立場から医療関係者が患者に説明する場合、放射線の影響について正確かつわかりやすく説明する必要がある。正当化及び最適化を円滑に進めるためにも、また、医療における放射線関連事故の発生防止の観点からも、防護の専門家、医療関係者及び患者間のさらなるコミュニケーションも重要な課題の一つとなるであろう。

参考文献

- 1) 日経メディカルオンライン、<http://medical.nikkeibp.co.jp/leaf/all/gakkai/jcs2009/200903/509936.html>, 平成 23 年 2 月 17 日閲覧
- 2) UNSCEAR, UNSCEAR 2008, Report to the General Assembly, Scientific Annexes A and B., Volume I, 2010.
- 3) ICRP, ICRP Publication 102, Managing Patient Dose in Multi-Detector Computed Tomography (MDCT), Ann. ICRP 37 (1), 2007.
- 4) 熊取町, ホウ素中性子補足療法 (BNCT) PR パンフレット, <http://www.town.kumatori.lg.jp/ikkwebBrowse/material/files/group/48/bnctpamphlet.pdf>, 平成 25 年 5 月 28 日閲覧.
- 5) 渡部陽一他, 放射線治療科学概論, 医療科学社, 2008.
- 6) ICRP, ICRP Publication 86, Prevention of Accidents to Patients Undergoing Radiation Therapy, Ann. ICRP 30 (3), 2000.
- 7) ICRP, ICRP Publication 87, Prevention of Accidents to Patients Undergoing Radiation Therapy, Ann. ICRP 30 (3), 2000.
- 8) ICRP, ICRP Publication 105, Radiological Protection in Medicine, Ann. ICRP 37 (6), 2007.
- 9) ICRP, ICRP Publication 112, Preventing Accidental Exposures from New External Beam Radiation

- Therapy Technologies, Ann. 39 (4), 2009.
- 10) 甲府市立甲府病院, RI 検査についてのお詫び, http://www.city-kofu-hp.jp/oshirase/files/ri_h230903.pdf, 平成 23 年 10 月 23 日閲覧.
 - 11) 日本核医学会, 放射性医薬品の過剰投与について, [http://www.jsnm.org/japanese/11-09-01- 0](http://www.jsnm.org/japanese/11-09-01-0), 平成 23 年 10 月 23 日閲覧.
 - 12) 文部科学省, <http://www.mext.go.jp>, 平成 22 年 12 月 2 日閲覧.
 - 13) ICRP, ICRP Publication 103, 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Ann. ICRP 37 (2-4), 2007.
 - 14) ICRP, ICRP Publication 73, Radiological Protection and Safety in Medicine Ann. ICRP 26 (2), 1996.
 - 15) ICRP, ICRP Supporting Guidance 2, Radiation and your patient – A Guide for Medical Practitioners Ann. ICRP 31 (4), 2001.
 - 16) IAEA, Safety Series No.115, International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for Safety of Radiation Sources, 1996.
 - 17) IAEA, Safety Reports Series No.59 Establishing Guidance Levels in X Ray Guided Medical Interventional Procedures: A Pilot Study, 2009.
 - 18) 日本放射線技術学会, 医療被ばくガイドライン 2006, <http://www.jart.jp/guideline/index.html>, 平成 22 年 12 月 2 日閲覧.
 - 19) A. Berrington de Gonzalez, S Darby, Risk of cancer from diagnostic X-rays estimates for the UK and 14 other countries, 363, LANCET, 2004.
 - 20) 近藤誠, 衝撃レポート CT 検査でがんになる, 文芸春秋, 2010.
 - 21) ICRP, ICRP Publication 84, Pregnancy and Medical Radiation, Ann. ICRP 30 (1), 2000.

ポジション・ステートメント(見解、提言(解説)、その他)

「燃料デブリ」について

2018年11月
日本原子力学会
核燃料部会

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所(1F)事故では、原子炉の炉心が溶融して、その一部あるいは大半が原子炉圧力容器の内部から格納容器の底部へ移行したものと考えられている。1F事故のような炉心が溶融する事故においては、溶融によって様々な物質ができる。それは、軽水炉の炉心は、二酸化ウラン(UO_2)を焼き固めて作った燃料ペレットをジルコニウム(Zr)合金製の燃料被覆管に詰めた燃料棒、燃料棒を束ねた燃料集合体を形作るための構造材、銀-インジウム-カドミウム(Ag-In-Cd)合金あるいは炭化ホウ素(B_4C)をステンレス鋼製の被覆管に封入した制御棒など、様々な物質から構成されるためである。炉心が溶融してできる物質は、固化する前の溶融した状態では「炉心溶融物質」あるいは「コリウム」などと呼ばれる。炉心溶融物質が固化したものは、固化する条件によって、塊状、粒状、殻状など様々な形態を示し、また、多孔質であったり緻密質であったりする。炉心溶融物質が塊状や粒状に固化したものや溶融しなかった燃料棒の破片などは燃料デブリと呼ばれる。デブリ(debris)とは破片やがれきを意味する語である。しかし、国内では、1F事故以降、炉心が溶融して固化してできる様々な物質は全て「燃料デブリ」と総称されるようになった。「燃料デブリ」には、「燃料デブリ」からの分離が困難な構造材やコンクリートの一部、さらには溶融には至らなかった燃料棒の一部も含まれる。

「燃料デブリ」の取り出し・保管・管理(長期的には処理・処分)は1Fの廃止措置における重要な課題である。これらを進める際には、「燃料デブリ」には放射性の核分裂生成物が多く含まれることや未燃焼の核分裂性のウラン(U)やプルトニウム(Pu)も含まれることに留意して、放射性元素を環境に放出しないこと、作業員の放射線被ばくを低減すること、取り出し中および保管中に臨界にならないようにすること、核物質管理のため「燃料デブリ」に含まれるUおよびPuの量をできるだけ正確に測定すること、などが要求される。これらの要求に応えつつ、「燃料デブリ」の取り出し・保管・管理を適切に進めるためには、「燃料デブリ」の組成や性状を把握しておく必要があり、現在、1Fにおける現場状況の観察や「燃料デブリ」の模擬物質等を用いた研究などが進められている。

本ステートメントでは、国内で「燃料デブリ」と呼ばれる物質の組成や性状はどのようなものであるかを示すため、「燃料デブリ」の生成過程と代表例、および「燃料デブリ」に関する研究の重要性について解説する。なお、以下の第2章と第3章においては末尾に掲げた文献1~4を参考にした。

2. 「燃料デブリ」の生成過程

原子炉の炉心に溶融等の重大な損傷を引き起こすような事故はシビアアクシデントと呼ばれる。軽水炉のシビアアクシデントにおいては、炉心に制御棒が挿入されて核分裂の連鎖反応が止まっても、炉心の適切な冷却が行われないと、燃料ペレット中の放射性物質の崩壊熱のために炉心の温度が上昇し、冷却水が失われ、炉心が露出する。これに伴い、Zr合金製の燃料被覆管が水(水蒸気)と反応して酸化することによって水素が発生する。燃料被覆管の酸化に伴って化学反応熱が発生するが、

この酸化反応は約 1200℃以上で著しくなり、炉心温度の一層の上昇を引き起こす。炉心温度が過度に上昇すると、以下に述べるような多様な化学反応を含む様々なプロセスで炉心の溶融が進展する。

軽水炉のシビアアクシデントにおいて溶融が生じる化学反応とその開始温度を図1に示す。図1には、ステンレス鋼の融点(約 1450℃) および燃料被覆管に用いられる Zr 合金の融点(約 1760℃) より低い温度においても、炉心に損傷や溶融が生じることが示されている。例えば、加圧水型軽水炉(PWR)の場合には、制御材である Ag-In-Cd 合金は約 800℃(融点)を超えると溶融する。約 1300℃を超えると、制御棒の被覆管に用いられるステンレス鋼と制御棒案内管や燃料被覆管に用いられる Zr 合金との共晶反応¹⁾によって溶融が生じる。1Fのような沸騰水型軽水炉(BWR)の場合には、約 1200℃を超えると、ステンレス鋼

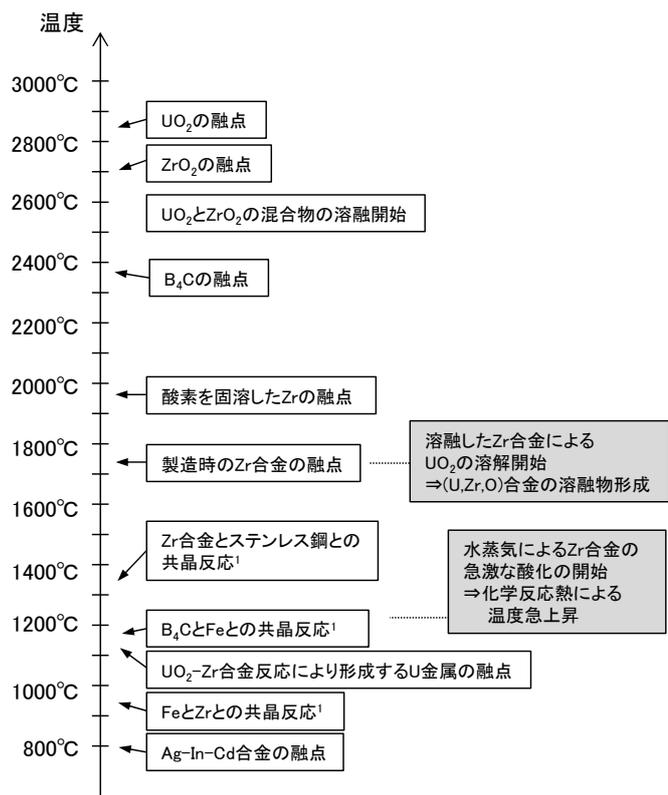


図1 軽水炉のシビアアクシデントにおいて溶融が生じる化学反応の開始温度と原子炉を構成する主な物質の融点(文献2を参考に作成)

製の制御棒被覆管とその中に封入されている制御材である B₄C との共晶反応によって溶融が生じる。約 1300℃を超えると、制御棒の被覆管や構造材に用いられるステンレス鋼とチャンネルボックスや燃料被覆管に用いられる Zr 合金との共晶反応によって溶融が生じる。PWR と BWR のいずれにおいても Zr 合金製の燃料被覆管は、酸化していない場合には約 1760℃で溶融する。溶融した燃料被覆管は、燃料被覆管の酸化物層(主として二酸化ジルコニウム(ZrO₂))や燃料ペレットを溶解する。約 2600℃を超えると、UO₂ と ZrO₂の混合物、ZrO₂、さらには UO₂が溶融する。このような高温では、これらの酸化物は互いに溶け合う。

このような炉心が溶融するプロセスは、炉心内の場所、燃料棒の燃焼の進行の度合い、炉心内に残った冷却水の量、注水の条件などによって異なる。例えば、損傷した炉心には注水して溶融の進展を抑える必要があるが、一方で、注水によって、Zr 合金の大規模な酸化による化学反応熱と水素の発生、酸化によって脆くなった物質の急冷による崩壊などが誘発される。溶融した炉心の一部や構造的な支持を失った燃料ペレット等は落下し、比較的溫度が低く、構造物が多い炉心下部で固化したり堆積したりする。残留している崩壊熱や水蒸気による Zr 合金の酸化に伴う化学反応熱が十分に除去されない場合、堆積した物質の一部が再び溶融し、原子炉圧力容器の底部に移動する。

炉心溶融物質による熱的な影響などによって原子炉圧力容器が破損すると、炉心溶融物質は格納容

¹⁾ 例えば、Fe(融点 1538℃)と Zr(融点 1855℃)が接触している部分は双方の融点より低い約 930℃で溶融し始める。こうしてできた液体を冷却すると Fe と Zr の割合が異なる 2 種類の固体が共に出現することから、このような反応は「共晶反応」と呼ばれる。ここでは、2 種類の物質が接触している部分が双方の融点より低い温度で溶融し始めるような反応を「共晶反応」と呼んでいる。

器底部のコンクリート上に移動し、コンクリートと相互作用を起こして、コンクリートを侵食する。

この相互作用は炉心溶融物質－コンクリート相互作用（Molten Core-Concrete Interaction：MCCI）と呼ばれる。MCCIでは、コンクリートの分解と溶融、酸化カルシウム（CaO）と二酸化ケイ素（SiO₂）を主成分とするコンクリート分解生成物の炉心溶融物質への溶解、炉心溶融物質に含まれる Zr 等の金属成分によるコンクリート

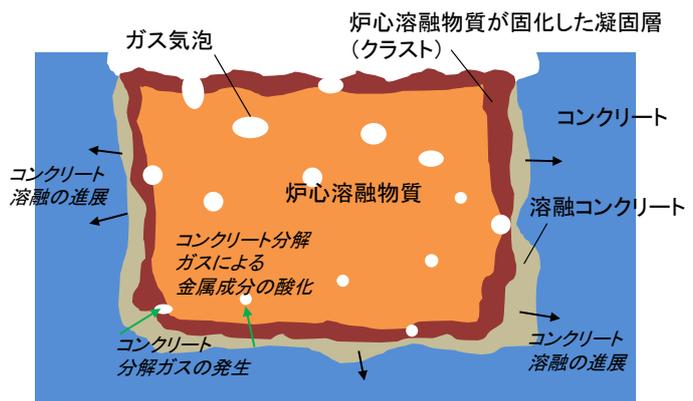


図2 炉心溶融物質－コンクリート相互作用の模式図
(文献 4 を参考に作成)

成分の還元とこれに伴う水素や一酸化炭素等のガスの発生など、図 2 に示すような様々な化学反応や物理的变化が起きる。MCCIによって生成する物質も「燃料デブリ」に含まれるが、この組成や性状は、コンクリートの種類、炉心溶融物質中に含まれる金属成分の量、注水の有無などによって広範囲に変化し得る。

時間が経過するにつれて崩壊熱が低下して、周囲の構造物等への熱の放散の方が大きくなると、炉心溶融物質が凝固し、溶融の進展が止まる。注水等による冷却が有効に働いた場合にはその時点で溶融の進展が止まる。

3. 「燃料デブリ」の代表例

米国スリーマイルアイランド原子力発電所 2 号機

(TMI-2、PWR)²で起きたシビアアクシデントでは、炉心全体の約 45%に相当する約 62t が溶融した。溶融は炉心中央で始まり、炉心溶融物質は炉心下部で一旦固

化した再び溶融し、19t の炉心溶融物質が冷却材の溜まった原子炉压力容器の底に移動したと考えられている (図 3)。事故後の炉内の調査の結果、原子炉压力容器から採取された「燃料デブリ」は様々な物質から成ることがわかった。炉心中心よりやや下方 (図 3 の中央部の黄色の部分) では、炉心溶融物質がプールのように溜まった領域が形成されたと考えられ、それが固化した領域では、(U, Zr)O₂ 固溶体あるいは U/Zr 比が異なる (U, Zr)O₂ と (Zr, U)O₂ の混合物から成る酸化物が大部分を占め、これに少量の金属の部分が混在していた。この領域から採取された「燃料デブリ」の写真の一例を図 4 に示す。その下の下部クラスト層と呼ばれる領域 (図 3 の中央部の黄色の領域を取り巻く橙色の部分の下

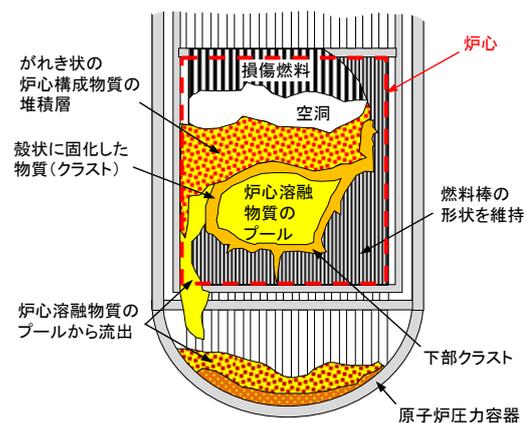


図3 TMI-2シビアアクシデント時の状況 (推定)
(文献 3 を参考に作成)

² 米国スリーマイルアイランド原子力発電所 2 号機(TMI-2)はバブコック&ウイルコック社の設計による電気出力 95.9 万 kW の PWR 型で、1978 年 3 月に臨界となり、同年 12 月に運転を開始した。事故が発生したのは 1979 年 3 月 28 日午前 4 時であった。約 97%で定格出力運転中、制御用空気系の故障のため主給水ポンプが停止、更にタービンが停止したことから、原子炉一次系の温度、圧力が上昇したため設計通り加圧器逃し弁が開き、原子炉は緊急停止した。その後、一次系圧力低下に伴って自動的に閉まるべき加圧器逃し弁が故障して開固着の状態となり、ここから一次冷却水が系外に流失した。このため炉心は 2/3 が露出して大きな損傷をうけた。この事故に伴って放射性物質の外部放出による周辺公衆の個人の被曝線量は 1mSv 以下であり、健康に与える影響はほとんど無視できる程度であった。

(参考：(一財) 高度情報科学技術研究機構「原子力百科辞典 ATOMICA」<http://www.rist.or.jp/atomica/index.html>)

半分)では、事故前の形状を残した燃料ペレットを Zr や Fe を主成分とする金属部分が取り囲んだ「燃料デブリ」も見られた。原子炉压力容器の底に移行したものは、上述の溶融プール領域と同様の酸化物で多孔質となっており、塊状や粒状など様々な性状を示した。



図4 TMI-2燃料デブリの例 (いずれも溶融プール形成領域から採取されたもの)
(日本原子力研究開発機構より提供)

4. 「燃料デブリ」に関する研究の重要性

以上に述べたように、「燃料デブリ」は、炉心溶融の進行の度合い、冷却水の残留量、注水の有無など様々な因子に影響を受けながら、様々なプロセスを経て形成される。「燃料デブリ」は、 $(U, Zr)O_2$ 、 UO_2 、 ZrO_2 などの酸化物の部分および Zr、Fe、Fe-Zr 合金などの金属の部分に加えて、条件によっては未反応あるいは未溶融の燃料ペレット、制御棒の一部、各種構造材、核分裂生成物などが混在したものとなる。燃料ペレット中で生成する Pu や MOX 燃料ペレットに含まれる Pu も「燃料デブリ」に含まれる。MCCI に至った場合には、砂や砂利などの骨材を含むコンクリートの成分も加わる。そのため、「燃料デブリ」の組成は広範囲に変化する。また、「燃料デブリ」の性状も、塊状、粒状、殻状、多孔質、緻密質など、様々である。さらに、「燃料デブリ」の組成や性状は、原子炉压力容器内あるいは格納容器内で存在する場所によって異なる。別の見方をすれば、「燃料デブリ」の組成や性状、これらの存在する場所による違いなどを詳細に調査、分析することによって、実際の事象進展をある程度推定することができる。

先に述べた「燃料デブリ」の生成過程はこれまでの多くの試験によって解明されてきたものであるが、中でも原子炉压力容器が破損する前までのシビアアクシデントの事象進展過程の解明には、TMI-2の事故後調査において実施された「燃料デブリ」の組成、性状、分布の調査と分析の結果が役立った。一方、水（水蒸気）との反応を含むホウ素（B）の挙動やMCCIにおける核分裂生成物の挙動など、「燃料デブリ」の生成過程と特性については未解明の部分もある。

1Fにおいては各号機によって事象進展の状況が異なるため、多種多様の「燃料デブリ」が形成されたものと推察されるが、1Fの「燃料デブリ」の調査と分析は、「燃料デブリ」の取り出し・保管・管理だけでなく、事象進展状況の推定にも有用である。また、「燃料デブリ」の生成過程と特性に関連する未解明の点に対する研究も重要である。このような1Fの「燃料デブリ」の詳細な調査と分析、および「燃料デブリ」に関する研究は、シビアアクシデントの事象進展過程の理解の深化を通じて、軽水炉の安全性向上にも役立つ。

参考文献：

1. In-Vessel Core Degradation in LWR Severe Accidents: A State-of-the-Art Report to CSNI, NEA/CSNI/R(91)12 (1991).
2. P. Hofmann, "Current Knowledge on Core Degradation Phenomena, a Review", J. Nucl. Mater. 270 (1999) 194-211.

3. R.K. McCardell, et al., "Summary of TMI-2 Core Sample Examinations", Nucl. Eng. and Design, 118 (1990) 441-449.
4. C. Journeau and P. Pilso, "Core Concrete Interaction", Comprehensive Nuclear Materials (ed. by R.J.M. Konings), volume 2, pp. 635-654, Amsterdam, Elsevier (2012).