

連載講座 よくわかる核融合炉のしくみ

第11回 核融合炉の安全性

日本原子力研究開発機構 大平 茂

国際熱核融合実験炉(ITER)の建設サイトがフランスのカダラッシュに決まりました。日本の核融合計画においてITERは、実用化に向けた発電を行う原型炉の前段階の実験装置と位置付けられており、未来のエネルギー源の一つとしての核融合の将来を見据える意味で、核融合炉の工学的な成立性だけでなく安全性の面においても、その成否が重要となります。

ITERのフランスに立地が決まるまでは、日本に立地することを前提にITER施設の安全確保について検討を進めてきたわけですが、この検討においては、核融合炉の持つ原理的な安全性を十分に汲み入れ、合理的な考え方を構築してきました。本稿では、これから建設が始まるITERの安全上の基本的な特徴と安全確保上必要な要件を明らかにし、今後設計が進められていく原型炉との相違を明らかにしながら核融合炉の安全性について述べます。また、現状で考えられている核融合炉において発生する廃棄物の処理・処分についても説明します。

・核融合炉の安全上の特徴って何ですか？

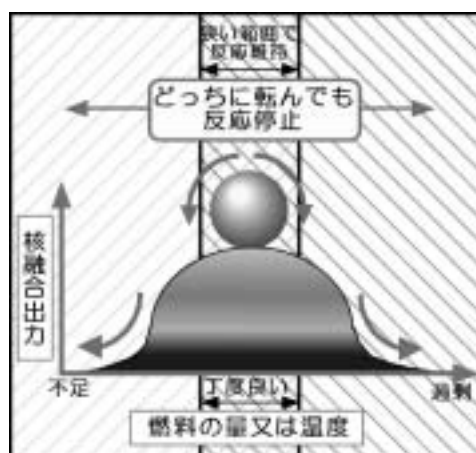
1. 利用する核反応及びそのエネルギーの制御にはどのような特徴がありますか？

これまでのこの連載の説明にあるように、核融合炉では、核融合反応のうち、重水素原子核と三重水素の原子核とが融合(D-T核融合反応)するときにエネルギーが発生する現象を利用します。ここで、核融合では正の電荷を持った原子核同士をクーロン斥力によって逆らって融合させるため、融合させる原子核

同士に高いエネルギーを持たせる必要があることが特徴的です。さらに、核融合では、反応生成物(例えばD-T核融合反応ではヘリウム原子核(α 粒子)と中性子)が次の核融合反応を直接的に引き起こし、連鎖的に進むことはありません。

一般的に、磁場閉じ込め方式による核融合反応の制御では、第1図で模式的に示すように、核融合反応が起こるある理想的な閉じ込め条件(温度、密度、時間)のプラズマを維持することが必要であり、燃料(ガス、固体ペレット、中性粒子ビームなどで高真空中に注入)の過注入などによってプラズマの粒子密度や圧力の限界を超えたり、不純物が混入したりすると、核融合反応に必要なプラズマの温度や閉じ込め状態が維持できず、結果的に反応が終息してしまうという性質があります。すなわち、反応の制御を誤ったとしても、核融合反応が暴走するようなことは原理的に起こりません。

D-T核融合反応では、反応で発生したエネルギーの大部分が、その反応生成物である中性子を媒介とし核融合反応が起こる希薄なプラズマの外で取り出され、中性子は反応の制御性には直接には関与しま



第1図 核融合の反応終息性

Intelligible Seminar on Fusion Reactors (11) Safety of Fusion Reactor Safety Characteristics and Requirements : Shigeru O HIRA.

(2005年 11月11日 受理)

せん。なお、もう一つの核融合反応の反応生成物である正の電荷を帯びた α 粒子(3.52 MeV)によって、ある条件のもとでは、プラズマが過剰に加熱されることがあります。しかし、前述のように、プラズマの粒子密度や圧力には限界があり、またプラズマの温度上昇に伴うプラズマ対向壁からの不純物混入等があるために、過剰な出力上昇があったとしても反応は比較的短い時定数をもって自動的に終息します。

少なくとも ITER では、このような出力上昇に耐えるように、真空容器等の放射性物質内蔵機器の構造強度を適切に確保するだけで十分であり、緊急停止装置のような特段の安全装置は必要なりません。しかし、一方で ITER では、真空容器内に装備されるブランケットやダイバータといった真空容器内機器は試験機器と位置付けられており、それらが熱負荷試験等の際に破損することを考慮しています。そして、その破損により真空容器内に冷却材が放出され、真空容器内の圧力が上昇しても、その圧力を緩和し、真空容器の閉じ込め機能の健全性を維持するための設備(圧力緩衝機構)が設けられており、放射性物質が建家内には放出されないようにする設計となっています。

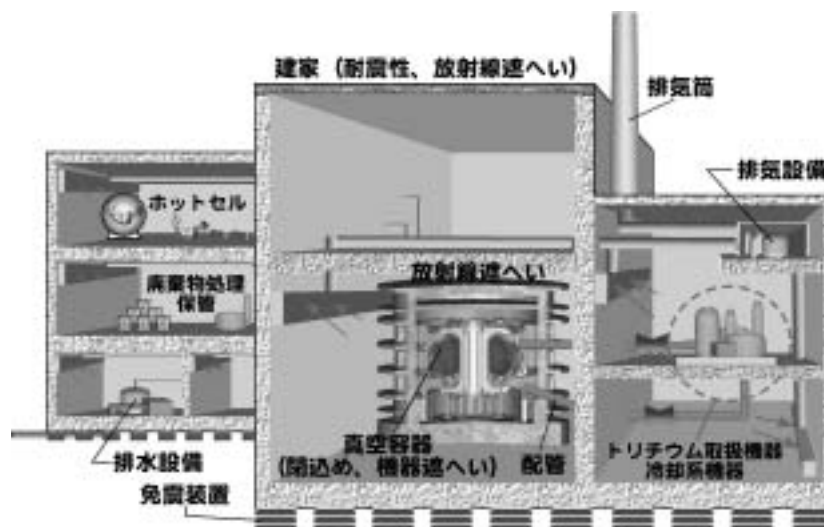
将来の原型炉等においては、エネルギーの安定供給のため、運転の継続性が求められるので、真空容器内機器の位置付けもおのずと変わり、通常運転時

に想定される荷重や熱に対して損傷しないように設計しなければなりません。

2. 内蔵する放射性物質とその特徴はどのようなものですか？

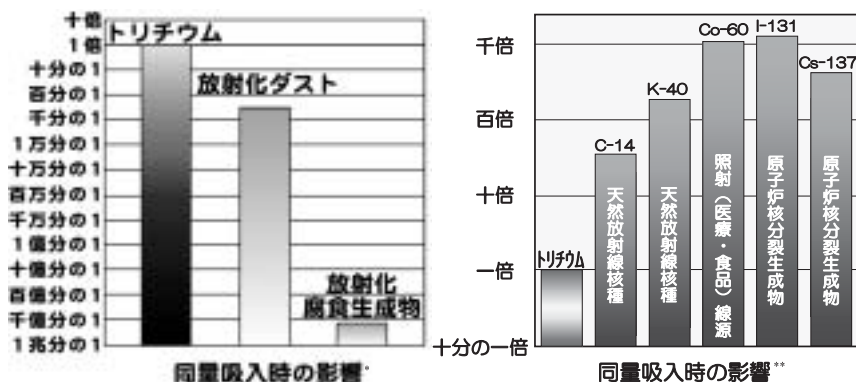
第2図に核融合炉(この場合は ITER)の放射性物質の閉じ込め形態を示します。核融合炉では、真空容器内機器や真空容器の構成材料は発生した中性子により放射化しますが、後で述べるように、この放射性物質の崩壊熱の密度は、核分裂炉での核分裂生成物に起因するものと比較するとはるかに小さくなります。

また、核融合炉では、易動性(流体などの動きにつれて移動されやすい)放射性物質としてトリチウムおよび放射化ダストが存在します。例えば、ITER においては、その最終設計報告書¹⁾によれば、施設内のトリチウム保有量は約 3 kg(約 10^{18} Bq)であり、そのうち、約 1.2 kg が真空容器内(主に、ブランケット、ダイバータ等の真空容器内機器に滞留、実際にはこれ未満になるように管理する)に、また残りは燃料処理貯蔵施設の各機器に分散して存在します。一方、放射化ダストについては、プラズマに対向する壁面での損耗作用により生成しますが、ITER においては、これまでの実験結果等を踏まえ、真空容器内に存在するタングステンダスト、ベリリウムダスト、炭素繊維複合材のダストの上限の量を、それ



放射線は適切に遮蔽します。
 機器から放射性物質が漏れにくくします。
 放射性物質を内蔵する装置を頑丈に設計し維持します。
 建家内に出た放射性物質は除去します。

第2図 安全を確保するための具体的対応



* : トリチウムに対してそれと同量 (g) の放射化ダストおよび放射化腐食生成物を吸入した場合のおおのに含まれる放射性核種による被ばく量を相対的に比較したもの。
 ** : 科学技術庁告示第 5 号「放射線を出す同位元素の数量を定める件」別表第 1 に記載されている“吸入摂取した場合の実効線量係数 (mSv/Bq)”についてトリチウム(水状)のものそれぞれの核種におけるが最も厳しい化学形等の値を相対的に評価したものの。

第 3 図 ITER が内蔵する放射性物質の影響度

それぞれ 100 kg, 100 kg, 200 kg とするよう管理します。

これらのうち、タンゲステンダストは、体外被ばくのソースタームとして、約 10^{16} MeV・Bq タンゲステンダスト 100 kg 中の核種の実効エネルギーと放射能の積の合計)と評価されています。

第 3 図は ITER で扱う、または発生する放射性物質の影響度について簡単に説明したものです。第 3 図の左図は、トリチウム、放射化ダスト、放射化腐食生成物について、それらの持っている影響度を比べたグラフです。また、トリチウム、放射化ダスト、放射化腐食生成物のそれぞれを同量体内に摂取した場合の影響をトリチウムの影響を 1 として比較しています。この図に示すとおり、ITER に存在する放射性物質の中では、トリチウムが最も影響が大きくなることとなりますが、第 3 図の右図のように、一般によく知られている放射性同位元素とその影響度を比べると、トリチウムは、比較的危険性の小さい放射性同位元素だということがわかります。しかし、これらの ITER に存在する放射性物質については、同じように放射能を持ち、易動性である核分裂生成物によく含まれる ^{131}I や ^{137}Cs といったものと比較して、影響度においては相対的には小さいものであっても、それを過度に摂取するとやはり危険です。ただ、これは放射性物質だけに当てはまることではなく、化学薬品や薬、一般の食品についても同じです。例えば、醤油、塩や水でも大量に飲み込めば相応の危険にさらされます。したがって、ITER に存在する放射性物質を公衆や作業員が過度に体内に取り込むことがないように、適切に管理することが重要

となるのです。

原型炉以降の核融合炉については、まだ設計や材料が決まっていないために、どれだけの放射性物質を内蔵することになるかを予想するのは困難ですが、次のように考えることはできます。

例えば、原型炉以降ではトリチウムを自己生産するためのトリチウム増殖ブランケットが装着されます。これがもとで、施設に保有するトリチウムの量はどうなるかですが、もしトリチウム回収が効率的に行われるようなシステムが構築できるならば、ITER に比べて、減ることはあっても増えることはない設計は可能であろうと想像されます。また、炭素を含有しないプラズマ対向材料を用いることが可能であれば、真空容器内のトリチウムの蓄積量は、ITER よりずっと少なくできる可能性もあります。また、放射化ダストについても、その主な発生原因であるプラズマディスラプション^{a)}が起こりにくい運転方法の確立やプラズマ対向材料を工夫することによって量や潜在的危険性を低減することができる考えられます。

^{a)} トカマク型の磁場閉じ込め方式で磁場とプラズマの圧力のバランスが崩れてプラズマが不安定になり崩壊し、プラズマ電流が突然切れてプラズマが消滅する現象。ディスラプションが起こると、閉じ込め磁場が崩れて高いエネルギーを持った粒子が真空容器内壁を覆うように置かれているプラズマ対向機器(ブランケットおよびダイバータ)に当たるため、表面が一部溶けたり、蒸発したりします。また、プラズマ電流が切れる時の磁場の急激な変化に伴って、プラズマの周りの金属材料に誘導電流が流れ、電磁力が発生します。

3. 安全確保のための要点は何でしょう？

一般に、放射性物質を内蔵するエネルギー発生装置の安全確保では、その物質の環境放出の抑制のために「有害物質を内蔵する機器を過熱する熱源を止める」、「運転中および止めた後の機器の壁を冷やす」、「機器を堅牢に作ってその機器の壁で有害物質を閉じ込めたり、仮に機器が壊れてもその外部に放出される有害物質を機器を囲む壁で閉じ込める」という3つの要件を満たす必要があります。また、放射性物質を環境へ放出する恐れに対して、その抑制のための設備を安全上重要な設備と位置付け、それらの信頼性を高めることも重要になります。

一方、核融合炉では、前述のとおり、反応が自然に止まってしまいますから、止める必要はなく、「止まる」のです。第1図で示した通り、何かの理由でプラズマに空気や水分など燃料以外の物質(不純物)が微量でも混入しますと、プラズマは放射冷却によって急冷されて核融合反応がすぐ停止します。このため、核融合炉では、核反応の暴走が起こってプラズマが真空容器を破壊するようなことは起こりません。

「冷やす」については、核融合反応の結果、ブランケットやダイバータで発生する熱エネルギー、壁やダイバータに入るプラズマの熱エネルギー、中性子照射を受けて放射化した材料が崩壊するときに出す崩壊熱などが放射性物質を内蔵する機器の壁の温度を上昇させる要因になります。ブランケットやダイバータで発生する熱エネルギーや壁やダイバータに入るプラズマの熱エネルギーに関しては、何らかの原因で核融合出力が定格値よりも大きくなったとしても、前述のとおり、核融合反応が短時間で自然に止まってしまい、これらの熱エネルギーによる放射性物質内蔵機器である真空容器の壁温度の上昇はなくなります。また、真空容器の材料としてオーステナイト系ステンレス鋼を使うITERでも、放射性核種の生成がほぼ均一であり、その崩壊熱密度は数百kW程度の出力の研究用原子炉の1/1,000程度と小さいこと、また、その崩壊熱に対して真空容器自体が巨大構造物であり極めて大きな熱容量を持つことから、真空容器の壁温度は運転中の温度と大差のない範囲に留まり、熱で壊れることはありません。崩壊熱は停止後も一定期間発生しますが、仮に、プラズマの停止と同時に真空容器の冷却材が瞬時に喪失しても、その温度が構造健全性を脅かすようなレベ

ルまでには上がりません²⁾。将来の原型炉等の材料はまだ決まっていませんが、例えば低放射化材料が使用される場合には、ITERと同じように崩壊熱密度は小さく安全上問題になるものではないだろうと考えられます。

結局、核融合炉では、安全確保の観点では「止める」と「冷やす」ことの重要性は希薄なのです。「閉じ込める」必要があるものは、放射能を持ち易動性のトリチウム等の放射性物質と核融合反応による中性子に起因した放射化物質および放射線です。特にトリチウムは酸素と結合してトリチウム水になると生体内に取り込まれ易くなりますので、「取扱い」と「閉じ込め」においては適切な安全対策が必要です³⁾。この閉じ込めの一環として放射性物質内蔵機器の構造強度を確保することが挙げられます⁴⁾。磁気閉じ込め型(特にトカマク型)の核融合炉では、これを確実にする上で磁気エネルギーを考慮することが特徴になります。ITERでは、磁場の急激な変化を伴うディスラプションや超電導磁石のクエンチが生じると、ステンレス鋼を使用する真空容器や超電導コイルのケーシング等に電磁力がかかるので、それらの電磁力の荷重も考慮し、過度の変形が起こって放射性物質の閉じ込め障壁そのものの損傷や超電導コイルがその内側の真空容器に当たるようなことを招かないよう構造強度等に余裕を持って設計します。また、中性子やそれによって放射化する構造材料等からの放射線(主に γ 線)の遮へいも重要です。

このような特徴から、放射性物質内蔵機器等に対して想定される荷重、使用条件および環境条件に耐える構造強度を確保することにより、放射性物質を放出するような「事故」の発生を防止します。さらにそれにもかかわらず、演繹的に「事故」を想定し、それに備えることとします。

この「事故」に対処するには、放射性物質の放出が起きている区画を隔離し負圧を保ち、その雰囲気中の放射性物質の除去を行うなどして汚染の拡大を最小化し、負圧維持のための汚染空気中の排気については、汚染空気中の放射性物質を除去する設備を介して排気筒からのみ放出し、周辺環境での放射性物質の濃度を低減することにします。また、商用電源系統からの電気の供給が停止する場合でも必要な設備の機能を維持するための非常用電源設備を設けます。さらに、これらの設備の信頼性を高めるため、例えば多重性または多様性を持たせます。また、安

全を確保する機能・性能を確認するための検査が可能ないように設計し、機能・性能を維持します。

これまで -1~ -3節で述べてきた ITER の安全上の特徴を第 1 表に示します。これらは、これまで国によって確認され、その安全確保の基本的考え方が取りまとめられています⁵⁾。

・核融合炉で出る放射性廃棄物の処理・処分はどうするのですか？

本章では、日本に ITER が誘致された場合に考えられていた ITER の廃止に伴って実施することを想定していた廃棄物の処理処分の計画について紹介します。

まず、ITER の最後の運転を終えた後 5 年間にトリチウムなどで汚染した物の除去を行います。放射

第 1 表 ITER の安全上の特徴(大要)

- (1) 核融合反応は、反応で生じた物が次の反応を引き起こさない。すなわち、原理的に暴走することのない反応である。
- (2) 核融合反応を起こすプラズマの保持は、限られた狭い範囲でのみなし得るものである。このため、いかなる原因により運転条件がこの範囲から外れても、反応は自ら速やかに止まる。
- (3) 施設に放射性同位元素が存在する。これらの許容されない作業区域および環境への放出を防止するための障壁が必要とされる。また、運転に伴い放射線が発生するため、作業区域および環境に対する放射線遮蔽が必要とされる。
- (4) 放射性同位元素を封入する機器には、元来より、本来機能達成上の厳しい要求から、内容物が漏れにくい構造と強度が備わる。それに加え、機器に溜まる熱を放置しても、自然に冷え、機器が熱で溶けるようなことも考えにくい。
- (5) 前記の特質にもかかわらず、機器が壊れたことをあえて仮想しても、実験段階に位置付けられる装置としての規模を考慮すると、漏れ出た放射性同位元素を取り囲む建物や常時運転される浄化設備を壊すような事態に進展することはない。このため、漏れ出た放射性同位元素はフィルタ等の浄化装置を介して十分な濃度希釈効果を有する排気筒から排出される。排出される放射性同位元素は主に三重水素であり、それは核分裂生成物のような高い放射能を有するものではない。したがって、このような状況においても、周辺公衆への放射線影響は避けずとも平常時と大差のない安全な水準に収まり、周辺公衆に大混乱を来すようなものではない。

化した物については、汚染除去期間の後 25 年間保管管理することで、放射能の減衰を待ちます。作業員が近づける程度に放射能が減衰したことを確認し、6 年間かけて解体します。

この解体の手順をわかりやすく示したのが第 4 図です。放射化した物を取り外し、細かく切断し、圧縮して容積を小さくしてから廃棄用の容器に詰め、廃棄体とします。この時点で、廃棄体の量は、運転時から保管していた分も合わせると、約 2 万トンであると推測されます。ただし、この量は、今の設計、廃棄物処理方法、運転計画から多めに見積もった量ですので、今後の設計の進捗、廃棄物処理の方法の合理化、あるいは運転実績によって変わると考えられます。

この約 2 万トンの廃棄体は、すべて低レベル廃棄物です。処分の方法については、第 5 図に示すような原子力委員会で定めた低レベル廃棄物の処分方法に従います。

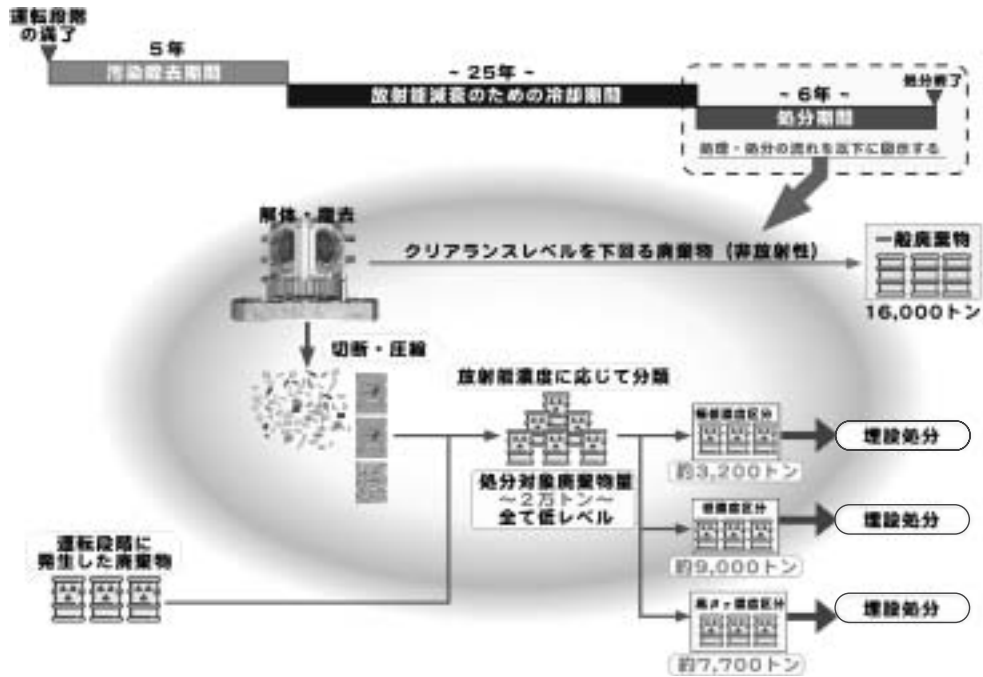
原子力委員会で定めた処分方法では、廃棄体中の放射性同位元素の濃度に応じて 3 区分に分類します。一番濃い区分を高ベータ・ガンマ濃度区分と呼びます。一番薄い区分を極低濃度区分と呼び、その中間の濃さのものを低濃度区分と呼びます。この 3 区分のそれぞれにふさわしい処分場を用意して、安全に埋設することを求めています。

処分場は、廃棄体中の放射性同位元素の濃度が濃いほど、地中深いところに設けられます。また、地下水などで処分場が劣化して、廃棄体から放射性同位元素が地下水とともに流れ出ることを抑制するために、高ベータ・ガンマ濃度区分と低濃度区分の処分場については、人工バリアを設けることが求められます。

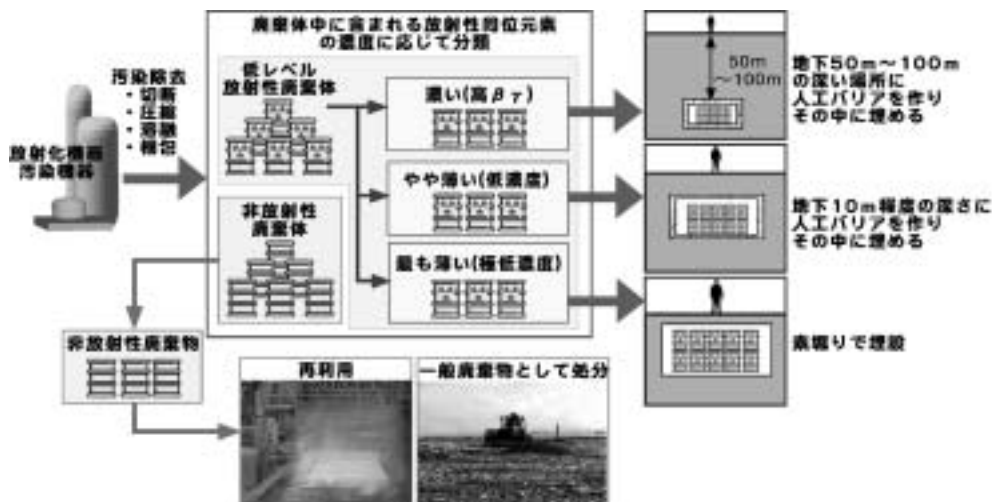
このように処分場を設計し、かつ、維持管理することで、処分場周辺の放射線を年間 10 μ Sv 未満に抑えることが求められています。

・将来の核融合炉の安全確保のためには何をすべきでしょうか？

ITER の次の段階である原型炉では、その技術目標がさらに高度になるために、当然、その施設や設備の仕様が変わってきます。例えば、効率的な発電をするために冷却材の温度は ITER よりもさらに高温になるはずですし、前にも述べたように、核融合反応で消費するトリチウムを再生産するための増殖



第4図 ITERの廃止措置の手順



第5図 我が国における低レベル廃棄物の処分方法の例

ブランケットも常設されるはずで、それになにより、“安定なエネルギーの供給”が求められるはずで、材料についてもより先進的な材料の使用が検討されるでしょう。そのために、基本的な仕様が固まった段階で、安全上課題となるものは何かということを出し・確認し、それに対する対策(必要なデータの蓄積, 信頼性の評価等も含めて)を立てていくことが重要だと考えられます。むしろ、そのためには実験炉であるITERの成果を最大限生かしていくことが必要と考えられます。

謝辞

これらの安全確保の考え方は、前ITER安全設計室に所属された次の方々のご尽力によって具体化されたことを申し添え、謝辞とさせていただきます。多田栄介(現ITER国際チーム, 核工学部), 羽田一彦(現原子力基礎工学研究部門, 耐放射性原子力材料Gr), 関谷 謙(現ITERプロジェクトユニット, ITERプラント開発Gr), 丸尾 毅(現研究炉加速器管理部, 研究炉技術課)。また、これらの考え方について、精査し、ご指導いただいた文部科学省, 原子力安全研究協会の委員会等の関係者の方々にも厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) *ITER Final Design Report*, ITER EDA Documentation Series 22, International Atomic Energy Agency(IAEA),(2001).
- 2) D. Tsuru, Y. Neyatani, T. Araki, *et al.*, " Study on decay heat removal of compact ITER ", *Fusion Eng. Des.*, 58-59, 985(2001).
- 3) 大平 茂, " ITER におけるトリチウムの安全取り扱いに向けた設計の考え方 ", *プラズマ・核融合学会誌*, 7[12], 1325(2002).
- 4) 多田栄介, 羽田一彦, 丸尾 毅, " ITER の安全性

と構造健全性の確保について ", *プラズマ・核融合学会誌*, 7[11], 1145(2002).

- 5) 文部科学省, ITER の安全確保について, 平成15年11月28日付け公開 .

著 者 紹 介

大平 茂(おおひら・しげる)



1986年東京工業大学総合理工学研究科博士課程卒業 / 日本原子力研究所入所, 現在, 日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 ITER 安全設計グループリーダー。専門分野/関心分野は, トリチウム安全取扱/特に放射線化学反応, 計量・測定技術。



新刊紹介

低線量放射線の健康影響

近藤宗平著, A 5 判 250 p (2005) 近畿大学出版局 ;
紀伊国屋書店(発売), (本体価格2,000円 + 税)

著者は, 物理学科の学生として京大の原爆調査隊に参加, 広島の惨状をつぶさに見て, 物理学から遺伝学, 基礎医学に転進, 国立遺伝学研究所室長, 阪大放射線基礎医学教授, 近大原子力研究所教授を歴任した放射線影響研究の第一人者である。

日本では, がん治療は手術が主流だが, 欧米では放射線治療へのシフトが目立つ。食品の殺菌・殺虫の方法として放射線照射を認めている国は50を超えている。しかし, 日本では, 照射食品の輸入や販売は禁じられている。この世界的に異常な日本の現状は, 「放射線は微量でも怖い」という迷信の信者が日本に多いことを反映している。こう考える著者は, 放射線を怖がり過ぎる日本人の感情的・独断的風潮が放射線を正しく怖がる理性的・科学的風潮に変わることを切望し, この願いの実現に役立つよう, 低線量放射線の健康影響の疫学的資料を総合的に集めた。また, 低線量放射線は健康に害がない証拠として, 放射線生物作用と放射線傷害の防護機能について, 分子レベルにまで立ち入った。

本書は一般向けの小冊子として, 放射線の特性から細胞, 実験動物および人体への影響までわかりやすく解説されているが, 放射線と生命科学の専門家の批判にも耐えうるよう, 手抜きはされていない。そのため DNA の傷の修復, アポトー

シス(修復が働く前に傷が引き金になった細胞の自殺)による細胞の死, 突然変異など生物応答のメカニズムに関しては読み進むのに多少の根気が必要である。

英国の放射線科医の100年間に及ぶ追跡調査, 米国の原子力船修理造船工, 中国の高自然放射線地域の住民, 女性の適度の胸部 X 線診断および定期航空便パイロットの宇宙線被ばくの調査結果を総括して, 適当な低線量(0.03 ~ 0.2 Sv)の慢性被ばくは, がんを抑制する健康有益効果があることを意味するとしている。しかし, 多くの疫学者や放射線防護専門家の解釈は違い, ホルミシスなどは存在しないと主張している。

論争の決着には, 放射線発がんのメカニズムを実験的に研究した成果を包括した議論が有効であるとして, 放射線感受性遺伝病をまず取り上げ, 低線量放射線による発がん機構の問題を議論したうえ, 自然発生の2本鎖 DNA 切断の変動幅の範囲内(たとえば自然放射線による切断数の数倍のレベル)であれば, 放射線は人体に無害であると考えてよいと思われるとしている。

原子力関連の分野の方々に広く読んでもらい, 低線量放射線のリスクの正しい知識を知ってもらいたいという願望でまとめられた本書は, 原子力学会員にはぜひ読んでいただきたい本である。

(放射線影響協会・金子正人)

