

取扱注意

(昭和58年度外務省委託研究報告書)

「原子炉施設に対する攻撃
の影響に関する一考察」

1984年2月
財団法人 日本国際問題研究所

ことわりがき

原子力施設攻撃禁止問題は、1980年以来軍縮会議において審議が行われている問題であり、我が国の関心事項の一つであるが、我が国においてはこれまで原子力施設、特に原子力発電所が攻撃された場合の影響に関する研究論文の類が全く存在していなかった。仮りにかかる論文が公になった場合の各方面（例えば、反原発運動等）への諸々の影響を考えれば、書かれなかったこと自体当然であったかもしれない。しかしながら、実際に軍縮会議において今後も原子力施設攻撃禁止問題の検討に携っていく立場にある者としては、原子力施設に対する攻撃が行われた場合の影響がどのようなものとなるのかを知っておくことは必要不可欠であり、かかる観点から、日本国際問題研究所に対しこの分野における委託研究を依頼した次第である。今般その最終報告書がまとまったので、各位の御高覧に供する。

なお、本報告書が上記に照らして有する機微な性格及び関係方面への影響等を勘案し、限定配布の部内資料（「取扱注意」なるも実質的に部外秘）とするので取扱いには厳に注意願いたい。また、本報告書の内容は当然のことながら、外務省の公式見解でないことを念のため申し添える。

昭和59年3月

外務省国際連合局軍縮課長

目 次

	ページ
1. はじめに	1
2. 原子炉施設に潜在する危険性	3
3. 攻撃のシナリオ	8
3-1. シナリオⅠ－補助電源喪失	10
3-2. シナリオⅡ－格納容器破壊	13
3-3. シナリオⅢ－原子炉の直接破壊	15
4. 被害の推定	16
4-1. 推定の手順	16
4-2. 放射線影響の特徴	17
4-3. 被害の概要	18
4-4. 補足	24
5. おわりに	26

付録

A. イスラエルによる原子炉施設爆撃	28
B. 放射線影響	34
C. 大気拡散	40
D. 人口分布	47
E. 原子力発電概説	52

1. はじめに

原子力施設に対する攻撃の危険性は、1981年6月、イスラエル空軍がイラクの研究用原子炉施設を爆撃したことによって現実のものとなった。

この場合には、イスラエル政府は、当該原子炉が運転にはいる直前に攻撃を行ったので、放射性物質を放散させる事態は避けられた。しかしながら、今後もし運転中の大型の原子力発電所が同様の攻撃を受けるようなことがあれば、心理的不安に基づく社会的混乱は測り知れず、事態は極めて深刻なものとなる惧れがある。

ひるがえって、今日の近代社会において、電力は不可欠のエネルギー源であり、それゆえ主要電源施設を攻撃し破壊することは、その国の総合戦力を低下せしめるとの観点から十分予想されるところである。

しかも電力供給に占める原子力発電の比重は世界的に増大しつつあり、我が国もその例外ではない。とりわけ、我が国の場合は、すでに二十数基の発電用原子炉と、いくつかの関連施設を有しており、かつその数は今後とも増大するので、この種の施設に対する攻撃の危険性に対しては重大な関心を払わざるをえない。

以上のような事柄と考慮に基づき、1982年6月、第2回国連軍縮特別総会では、鈴木総理(当時)が、「平和目的のための原子力施設の安全保障を確保する」ことの重要性を指摘し、このため日本としても積極的に貢献する用意がある旨を述べた。

続いて、1982年9月のジュネーヴ軍縮委員会(なお、本84年より軍縮会議と名称変更)で我が国は、「国際原子力機関の保障措置の適用を受ける平和目的の原子力施設を攻撃対象としない」ことを内容とする選択的議定書案の骨子を提出した。

今後、軍縮会議等での審議を通じて我が国の提案に対し国際的な合意を取りつけるためには、その主張を支える確かな論理が用意されてい

ければならない。まさにそのような理由により、本件委託研究が当研究所において実施されることとなったのである。

なお、原子力施設が攻撃された場合の影響を検討するためには、攻撃の結果生ずる被害の規模や特徴について正当な認識をもつことが不可欠であるが、この報告書では、大型の原子力発電施設が攻撃された場合について検討を行い、また、その被害に関しては、放射性物質の放散に伴う人的被害と長年月にわたって居住しえない地域の広さについて取りまとめることとした。

2. 原子炉施設に潜在する危険性

報告書の内容を理解するための予備知識として、原子炉施設に潜在する危険の基本について説明しよう。

原子炉にはいくつかの種類が存在するが、ここでは発電を目的とする原子炉を考える(付録E参照)。発電用原子炉として今日、世界的に最も普及している軽水炉についてみると、原子炉容器(または圧力容器)とよばれる肉厚の鋼製容器^(註1)の中に、多数本の燃料棒の集り(炉心という)が仕込まれていて、その中に含まれるウラン(ないしプルトニウム)の原子核が中性子の働きを受けて核分裂をする。

(注1: 最近の100万kwクラスの場合では、PWR(加圧水型)用で高さ約13m、内径4m強、肉厚約20cm、またBWR(沸騰水型)用で、高さ約23m、内径6m強、肉厚約15cmである。)

核分裂の際にエネルギー(熱)が放出され、その熱によって燃料棒の温度が上がる。原子炉容器の中は水(重水と区別するために軽水と呼ぶ)で満たされており(したがって燃料棒は水の中に浸っている)、そこで熱は燃料棒からまわりの水に伝わる。

一方核分裂によって割れた原子核はそれぞれ別の種類の2個の原子核に変わる。そしてそれらは、強い放射能をもっている(分裂生成物、フィSSION・プロダクツ、我が国ではFPと略称されることが多い)。

そこで出力の大きな原子炉を長期間運転していると、燃料棒の内部に多量の放射性物質が蓄積される。ただし、その大部分は燃料棒を構成する原子と原子の間に閉じ込められ、また燃料棒のさや(被覆管)によっても閉じ込められていて、その外側まで出てくることはない^(註2)。

(注2: この場合注意すべきことは、放射性物質は閉じ込められているものの、それが出す放射線(とくにガンマ線、それはエックス線と同様の電磁波である)は燃料棒を透過して出てくる。

したがって原子炉施設では十分な厚さの遮蔽壁(コンクリート壁)を

設けることによつて、従業員の健康を守っている。)

放射性物質が出す放射線(ガンマ線及びベータ線)が炉心の中を走る間に、それがもつていたエネルギーのかなりの部分が熱に変わる。詳しくいえば、この放射線は放射性物質の放射性崩壊に伴なつて出てくるので、この熱を崩壊熱と呼ぶ。しかしこの言葉はなじみにくいので、以下では余熱の発生、あるいは単に余熱と呼ぶ^(注3)。

(注3: 余熱と呼ぶと取るに足らない程度の熱と誤解される恐れがある。しかし、原子炉のもつ潜在的危険性の根本は、炉心内に閉じ込められている多量の放射性物質と、原子炉の運転停止後も持続する余熱(崩壊熱)の発生とにあることを知つてほしい。)

原子炉の運転中は、核分裂自体から出るエネルギー(熱)の方が桁ちがいに大きいので、余熱(崩壊熱)はその影にかくれて目立たない(数パーセント程度)。しかし原子炉の運転を休止すると、つまり核分裂連鎖反応を制御棒の挿入によつて打切つても、余熱(崩壊熱)の発生はその後も相当の期間続く。

ところで発電用原子炉の場合、その運転中、発生した熱の約3分の1は電気に変わり、残りの熱(廃熱)は環境に放散される。我が国の場合は例外なく、温排水の形で海に放出されており、したがつてこの系統を利用して、運転停止後の余熱も運び出される^(注4)。

(注4: 原子炉内の水の温度が相当高い間は、ここに述べたように平常運転時の廃熱処理の系統を利用するが、その後の余熱処理のために別に専用の熱交換器(細管の内外にある2種の流体の間で熱の授受が行われる装置)が設けられている。

この熱交換器を通つた熱も最終的には海(あるいは川や大気)に運び出すようになっていて、この系統をさして余熱除去系と呼ぶ。)

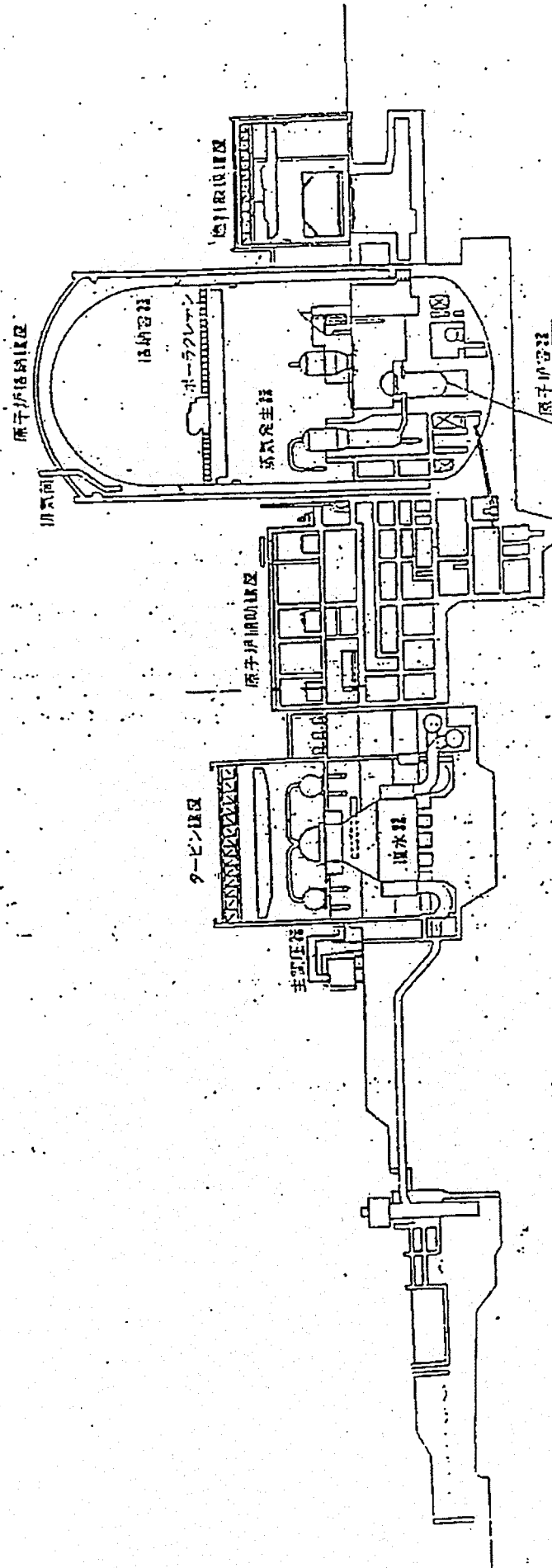
軽水炉の場合、すでに述べたように、炉心はつねに水の中にひたつてゐる。水は炉心によつて熱せられ(沸騰水型の場合は、一部が直接沸騰し

ながら)、原子炉の外側に送り出されてくる(この系統を1次冷却系という)。すなわち炉心の側からみれば、周囲の水によつて熱を奪われ、冷されて、過熱に至らない。この水は冷却材と呼ばれ、確実に循環するように設計されている。従つてこの冷却材が多量に洩れ出すような事故(冷却材喪失事故、Loss-of-Coolant Accidents=^{ロカ}LOCA)は極めて稀と考えられるが、その万一の場合に緊急に炉内に水を注入する系統が予め用意されており、非常用炉心冷却系(ECCS)と呼ばれる。この働きによつて、炉心は引続き水にひたされるので、余熱(崩壊熱)によつて炉心が過熱する危険が避けられる。

— そのような配慮があつても、何らかの故障や誤操作が重なり、その結果炉心が水から露出し、過熱によつて破損し、相当多量の放射性物質が原子炉容器の外へ出てくるようなことが絶対にないとはいえない。そのような場合にもなお人々の安全を守る目的で、さらに外側に格納容器(コンテナ)が設けられている(第1図、第2図)。

格納容器とは、原子炉とその周りの主な付属設備をすつぱりと包み込む堅牢な園い(建物)であつて、こうすることによつて、原因が何であれ、万一、大量の放射性物質が原子炉の外側へ出るような事態が生じても、それらは必ず格納容器の壁に阻まれて、直接環境に放散する危険が避けられる仕組みになつている。

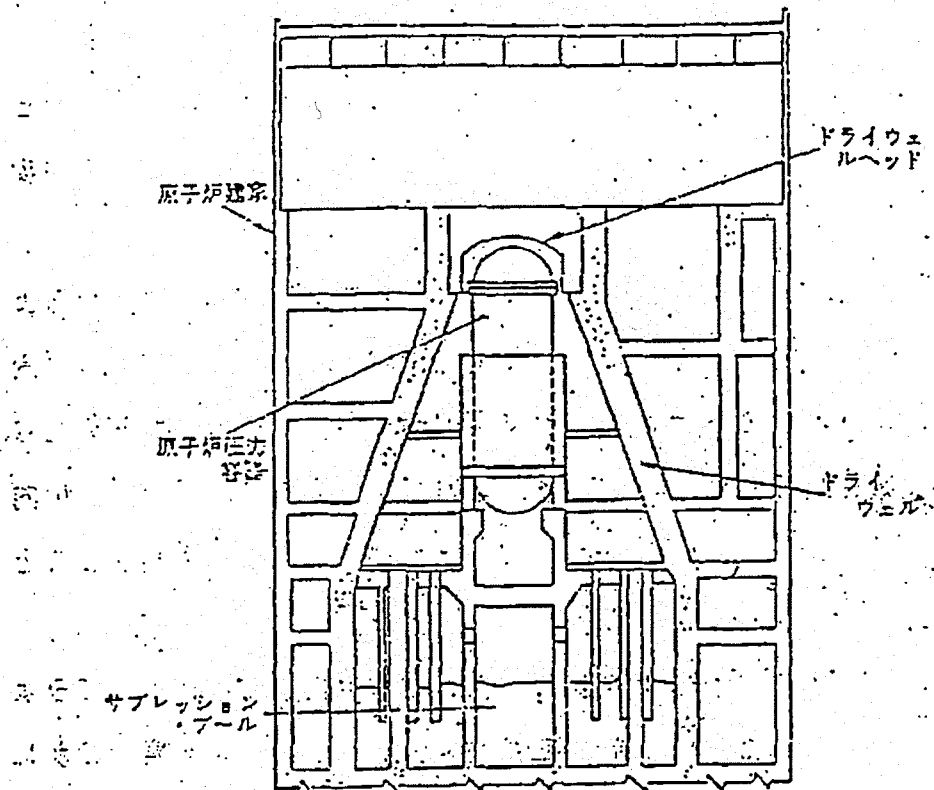
以上の説明からわかるように、原子炉施設の安全を確保する上で特に大切なものをあげるとすれば、原子炉容器とこれから出る配管系、格納容器、非常用炉心冷却系(ECCS)、余熱(崩壊熱)除去系などである。



第1図 最近のPWR型原子力発電所の例

格納容器の高さ 約80m、内径 約40m
肉厚 (鉄筋コンクリート) 約1.2m

第 2 図



最近の B W R 用格納容器の例

高さ 約 48 m 、内径約 $26\sim 29\text{ m}$

ドライウエル (鉄筋コンクリート製)

の肉厚約 1.9 m 。

3. 攻撃のシナリオ

原子力発電所のもつ発電能力を失わせるためには、必ずしも格納容器とその内部にある原子炉自体を攻撃する必要はない。

発電所からは発生した電力を送り出すために送電線が出ており、とくに原子力発電所の場合には電力消費地域との間に延々と送電線がのびている。この送電線を破壊切断すれば、電力供給は確実に阻止される。

もしも復旧の困難さを狙うのであれば、タービン発電機を攻撃目標とすることもありうる(ただし、この場合は隣接する原子炉建屋に被害が及ぶ可能性がある。)

以上のような事情にも拘らず、原子炉ないし格納容器の破壊に至るような攻撃を行うならば、それは単に発電能力阻止が目的ではなく、炉内の大量の放射性物質の放散による効果を狙ったものと見なさざるをえない。その攻撃が核兵器によらない通常兵器によるものであっても、炉内に蓄積されている放射能の大きさを知れば、事の重大性を推測することができよう。

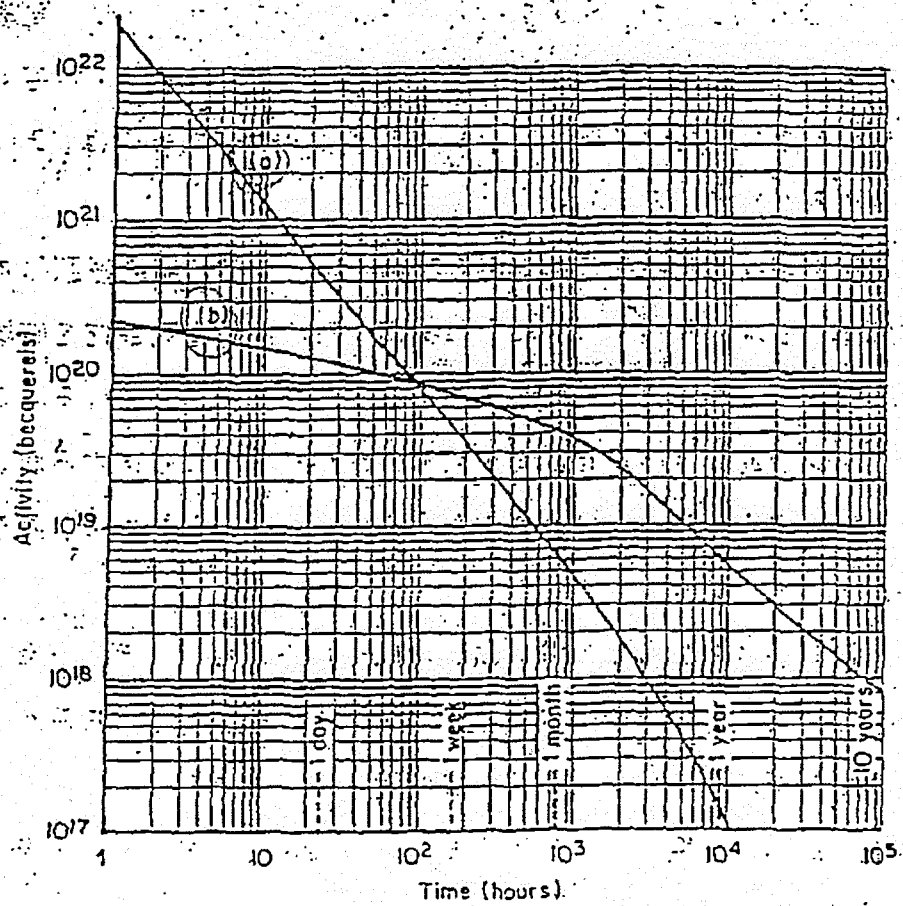
その目的のため、原子爆弾によつて生じる放射能の量と比較してみよう(第3図)。いうまでもなく原子爆弾の場合には、放射線影響のほかに強烈な熱線と爆風の効果があるために、被害の様相は大いに異なるのであるが、ここでは放射能に限つて比較している点に注意したい。

図からわかるように、1メガトンの核分裂爆弾から生じる放射能に比べて、100万kw級の軽水炉の炉心内の放射能には、比較的短寿命のものが少なく、逆に長寿命のものが多く結果、数日後にはその大小関係は逆転する。

このことからわかるように、原子炉内には極めて多量の放射能が存在し、これを故意に外部に放散させる行為に対しては、厳しい国際的非難が浴びせられて当然である。

第3図 原子炉と核爆弾との放射能量の比較

1メガトン核分裂爆弾の爆発後の放射
 能量(a)を100万kW軽水炉の停止後の
 炉心内放射能量(b)と比較した。



$$1 \text{ Bq} = 2.703 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

以下では、そのような意図をもって攻撃するとした場合の幾つかのシナリオを想定し、その際の被害について検討を行う。ただし、今回の調査では核兵器による攻撃は含まれていない。

3-1. シナリオⅠ 一補助電源喪失

第1のシナリオとして、発電所のもつ補助電源のすべてが破壊された場合を考える。

発電所が運転されている間は、所内の運転維持に必要な電力は、自分の発電したものの一部を利用すれば足りる。しかし原子炉の運転休止中は、すでに述べた余熱(崩壊熱)の処理などのために、ポンプ類の運転など若干の動力を別に確保しなければならず、通常は送電線を利用して、逆に外からの電気をもらって利用する。さらに所内にはディーゼル発電機(複数)があり、また蓄電池(複数)も用意されていて、外部からの電気が故障で利用できない場合に備えている。(設備を複数にするのは、その信頼度を高めるためである。)

そこで、送電線ないし所内の送受電の設備および所内の補助電源のすべてを破壊されるか、あるいはそれらに関連する所内の電気系統を破壊され、かつ即時復旧ができない程度に破壊された場合が問題になる。この場合、原子炉の運転は停止せざるをえず、かつ自動的に停止するが、その後の余熱の発生に関しては、動力が全く失われているために、熱を外へ運び出すことができない。(注1)

(注1：送電線が外部からの攻撃に弱いのはやむをえない。ディーゼル発電機については、ふつう発電所建物の外縁に置かれている例が多く、従って外部からの攻撃に対し比較的弱い状況にある。

蓄電池は最も信頼度の高い補助電源として設置されており、外部からの攻撃には最も抵抗力が高いと思われる。

しかしながら、破壊工作を受けた場合には、これらのすべて、あるいはそれに係る電気系統のすべてが破壊されその機能を失う危険を考

えざるをえない。

近年世界的に、社会情勢の不安定な国が少なくなく、それらの国では破壊工作に対する原子力発電施設の防御が重大な関心事になりつつある。

なお付言すれば、余熱除去系のうち、とくに海水取水用ポンプ施設ないしその電気系統が攻撃される危険も無視できない。このケースはシナリオⅠの一部とみなされる。)

発生する熱が原子炉施設の外に運び出されないとなると、炉心の温度は次第に上昇し、炉内の水の温度も圧力も上昇し、やがて1次冷却系の安全弁が開いて格納容器内へ蒸気となって吹出す。その結果、格納容器内の温度と圧力が上昇し、その圧力によつて容器が破壊するか、あるいは高温の故に、容器にあるいくつかの貫通孔のシール部が劣化して気密がそこなわれ、格納の働きを失う。

電源が失われているためECCSも働かず、炉心は過熱し遂にとける。燃料棒中に閉じ込められていた放射性物質は温度上昇につれて動き易くなり、また燃料溶融によつて解放され、また溶融燃料から気化するなどして、かなりの割合で原子炉容器内に放出される。

とけた炉心は原子炉容器の底にたまり、余熱の発生は続くので、その熱によつて底がとけて抜け落ちる。そこで放射性物質の多くが炉外に出、さらに格納容器の破損箇所を通して大気中に出ていく。

このような過程の中で、燃料棒の被覆管材料(ジルコニウム合金)が水と化学反応を起し、水から酸素が奪われ、水素が発生する。雰囲気の状態次第ではこの水素が爆発をおこし、被害が拡大する危険がある。(注2)

(注2: 水素爆発のほかに、とけた高温の炉心が、底にたまっている水に作用して水蒸気爆発を起す可能性もある。しかし最近の原子力安全研究の結果では、水蒸気爆発は仮に発生しても、破壊力の点で、さほど重大ではないと判断されつつある。

また別に、原子炉容器の底が抜けた後、とけた炉心が格納容器の床の上にたまり、床のコンクリートが破壊され、土中に沈降する可能性が考えられる。

(米国では真下が中国の方向に当るので、チャイナ・シンドローームと呼ばれている)。しかしこの場合は、放射性物質の多くが土中に捕捉され、大気中への放散が抑制され、あるいは、非常に遅れる結果、格納容器が破損して直接大気中に放散される場合に比較するならば被害は少ないと考えられる。)

付言すれば、補助電源のうち、例えば蓄電池だけでも健全であれば、それによつてある時間余熱の除去が可能となるため、格納容器の破損や炉心の溶融が数時間ないし十数時間遅れるものと期待できる。その間、寿命の短い放射性物質は放射性崩壊によつてかなり減衰するので、それだけ環境に及ぼす被害は少なくなる。

3-2. シナリオⅡ－格納容器破壊

第2のシナリオとして、格納容器が爆撃(ないし砲撃)され、破損する場合を考える。

格納容器と一口にいつても、その具体的設計は炉型により、また時代によつて相当に変化している。とくに外部からの攻撃に対する抵抗力の観点では個々の施設によつて相当の開きがみられる。

客観的に最近設計されたものでは、厚さが2 m近い鉄筋コンクリート製やプレストレスト・コンクリート製のものがみられ、耐震上の要求から鉄筋の含有率も高く、堅牢である。

そのようなものでは、たとえ1トンの爆弾が落下して来てもその衝突だけで貫通するということはない。けれどもその爆発力によつて、とくに貫徹力を高めた爆弾の場合には、大型爆弾でなくても器壁は破壊され崩れると予想される。^(注1)

(注1) 爆弾の全重量のうち火薬の占める割合は、通常爆弾の場合、50%をやや上回る程度であり、誘導型爆弾の場合には誘導装置の重さが加わるので、30%前後と考えられる。火薬重量と、貫徹される鉄筋コンクリートの厚さの関係は大略以下の通りである。)

鉄筋コンクリート壁 厚さ (m)	火 薬 重 量 (Kg)	
	(untamped)	(tamped)
1.5	1 0 0	4 0
2.5	4 0 0	1 6 0

かつ今日の誘導型爆弾(ミサイル)のもつ命中精度は極めて高いので、格納容器攻撃が一旦実行されれば、その器壁が破壊される危険性は高いと考えねばならない。

次に原子炉容器であるが、それは肉厚の鋼製容器であり、その堅牢さからみて、1個の爆弾によつて格納容器と同時に破壊されるとは考えられない。しかし破壊した格納容器の破片により、あるいは貫通後に爆発する仕組みの爆弾により、格納容器内の各種機器とりわけ配管類は被害を受ける可能性が高い。

この場合でも、補助電源の一部がなお健全で、ECCS(多重に設けられた非常用炉心冷却系)も必要な機能を温存しており、余熱除去系もほぼ健全であるならば、外部に被害が及ぶような事態には至らない。

一方、原子炉容器から出ている配管系(1次冷却系)が破損してLOCA(冷却材喪失事故)が発生し、かつECCS系も破壊された場合や、格納容器攻撃と併せて電源系統も破壊されたり、あるいは余熱除去系の末端が破壊されたりした場合には、やがて炉心は溶融するに至り、すでに破損している格納容器を通り抜けて大気中に放射性物質が放散される。

このシナリオの場合の大きな特徴は、格納容器の機能が真先に失われており、炉心の溶融後直ちに、あるいは比較的すみやかに放射性物質の大気放散が始まるところにある。

3-3. シナリオⅢ-原子炉の直接破壊

第3のシナリオとして、格納容器とその内部にある原子炉に対する徹底した攻撃を取り上げる。

命中精度の高い誘導型爆弾(ミサイル)を数個用いて、格納容器のみならず、その内部にある原子炉容器を破壊し、さらに炉心をも爆破する。この場合の現象の分析は難しい。

破壊された炉心の一部が堆積することもあるれば、逆に粉碎されて広く飛散するかも知れず、その状況に応じて燃料棒ないしその破片の温度上昇の様子は相当に異なるものと思われる。そのため、先のシナリオⅡの場合よりもさらに苛酷な事態になる恐れは大きいとしても、詳しい分析は容易でない。

4. 被害の推定

4-1 推定の手順

前節に述べた攻撃のシナリオに基づいて、原子力発電施設の周辺に生じる被害を推定するためには、大略以下のような評価作業を必要とする。

- i) 施設から大気中に放出される放射性物質の種類(放射性核種)と量の推定。
- ii) それらは気体あるいはミクロン程度の微粒子状となつて空気中に浮遊するが、それらを含む空気の塊り(放射性雲という、ただし目には見えない)が風下に移動しながら拡がっていく様子(大気拡散)の推定。^(注1)

(注1: 現実の原子力発電所では(立地選定の段階から気象観測を実施することによつて、風向、風速、大気安定度(空気が上下方向に混合し易いか否かをいう。混合しやすい場合を不安定、混合しにくい場合を安定という)、降雨などについて記録し、統計をとつてい

る。
但し、今回の報告書では地点を特定していないので概括的評価にとどまっている。)

iii) 放射性雲が風下に移動し拡散する間に主として下記のような経路によつて人体に放射線影響を及ぼす。

- (イ) 放射性雲が通過する間、その中の放射性物質から放出されるガンマ線によつて、体外から全身に照射を受ける。ただしこの全身照射は放射性雲が遠ざかるにつれて終わる。
- (ロ) 放射性雲が地表に接している場合には、その中にいる人は呼吸によつて放射性物質を体中にとり込むことになる。

そのあと

一部は呼気とともに体外に戻される。

一部は気管から食道に移り胃腸に至る。

一部は肺から血液に移り、さらに特定の臓器に沈着し、そして残りは肺にとどまる。

これらの経過のどれをとるかは、その核種とその化学的性質、粒子状物質の場合はその大きさなどによつて定まる。したがつて臓器によつて受ける放射線量に大きな差異がでる(この場合にはアルファ線とベータ線を重視する必要がある。)。

(イ) 放射性雲中に含まれる微粒子状の放射性物質は、少しずつ地表に付着していく。すなわち地表が放射能によつて汚染される。その結果として、
 (1) 地表から出るガンマ線によつて、体外から全身に照射を受ける。

(2) 農作物(とくに葉菜)の表面が汚染したものを食べることによつて体内にとりこまれる。

(3) また、汚染した牧草から牛乳を経て人体にはいる。

(ロ) 農作物の成長に伴い、根から放射性物質が吸収され、それを食べることによつて人体にとりこまれる。

(ハ) 地表に付着した放射性物質が再び空気中に浮遊し、呼吸によつて体内にとりこまれる。ただしこの影響はふつう非常に小さい。
 以上(イ)～(ハ)の各事項について評価し、最後に全身および各臓器ごとにそれらが受ける被曝線量を求める。

放射線影響の特徴

前節で述べたようにして人体が受ける放射線量がわかると、それによる放射線影響を見積ることができる。

放射線影響は、その発現の時期によつて二つに大別される。一つは急性、すなわち短時日のうちに症状が現われるものであり、いま一つは何れも年もたつてから後に影響の現われるもので晩発性とよばれる。

全身あるいは特定の臓器に一度に大量の線量をあびると急性障害が現

われ、線量がさらに多い場合には死亡する(急性死亡)。

高地に住む人々や放射性鉱物の多い地方に住む人々を除けば、ふつう1年間に自然に受ける放射線量は、全身で大略0.1レム(0.001シーベルト)である。その1000倍に当る100レムかそれ以上を全身にあびると、はきけなどの症状が現われ、数百レムをあびた場合には、半数の人々が2カ月以内に死亡する。この場合の主な原因は、骨髓が放射線を受けてその造血機能が損なわれる結果である。

一方、全身あるいは、ある臓器に受けた線量がそれほど大きくなく、急性疾状がない場合にも、10年ほどたつてから後に発癌する危険があることが知られている。もちろん受けた線量が低ければ低いほどその危険も少なく、その関係は比例すると考えて評価される。

この点をやや具体的に説明すれば、例えば全身照射の場合、仮りに1万人の人が夫々100レムを受けたか、1000万人の人が夫々0.1レム受けた場合、いずれも集団線量が100万人レムであるといい、その場合、大略100人の人がそれが原因で将来癌によつて死亡すると推定される。

なお晩発性影響としては、この癌死亡のほかに、遺伝的影響があるが、その問題は癌死亡に比較すれば小さいと考えられる。

4-3. 被害の概要

上述の方法に基づいて、第3章で述べた各シナリオの場合の被害を推定する。

シナリオⅠとⅡの場合を比べると、いずれも炉心溶融によつて燃料棒内に閉じこめられていた放射性物質のうちかなりのものが放出され、原子炉容器ないし容器から出ている配管系の破損によつて格納容器内へ移り、さらに格納容器の破損箇所を経て大気中に放出する点で共通している。

けれどもシナリオⅡでは格納容器がまず破壊されている点に大きな特徴がある。

原子炉の安全研究の分野では、さる1979年の米国のスリーマイル島の原子力発電所の事故を契機として、炉心が損傷した場合の現象の究明が進められつつあるが、炉心内の放射性物質のうち、とくにヨウ素などの大気中への放出割合に関しては、その周りの雰囲気の影響が大きく、とくに水の存在(あるいは湿分の多寡)が大きく関係することが次第に明らかになって来た。

シナリオⅡの場合には、炉心溶融から放射性物質の大気放出までの時間が比較的短いことのほかに、いま述べたような雰囲気の状態なども考えると、大気中に放出される放射性物質はシナリオⅠの場合を上回る可能性が高いと思われる。

一方、シナリオⅢについては、3-3でも説明したように、さらに大きな被害を生ずる恐れはあるものの、大気中に放出される放射性物質の割合やその放出状況を数字をあげて分析することは現状では困難である。

そのような事情から、以下ではシナリオⅡの場合の被害の推定について述べることにする。

さて、平和時の原子炉の安全研究において、炉心溶融までも考えて事故の経過と被害の推定を体系的に研究したものとして、ラスムッセン報告(末尾リスト1.)が知られている。また最近、同様の手法を用い、評価モデルの改良などを試みた報告(末尾リスト2.)もある。その中では、格納容器が初期に大きく破損したという条件のもとで、かつ安全上の諸設備が一部の機能を失った場合を一つのケースとして取り扱っている。(注1)

(注1: 注意すべきこととして、ラスムッセン報告にしても、この報告書にしても、このように苛酷な事故は、適切な安全対策のゆえにその発生する可能性(確率)は極めて小さいものと評価されている。しかしながら、軍事的攻撃の場合には、攻撃する側にある程度の知識さえ

あれば、相当の確からしきで、その種の苛酷な事態をひきおこしうる
点に大きな相違がある。)

100万kw級軽水炉の場合、炉心内の放射能の量は、運転履歴によつて若干の変動はあるものの、 8.1×10^9 キュリー(炉停止後30分値)の程度であり、その中から重要度の高いものとして54核種^(注2)を選び出し(5.1×10^9 キュリー)、その核種ごとに適当な放出割合を考慮することによつて大気中に放散される放射能量が推定される。^(注3)

(注2: 半減期が30分未満のものは省略されている。)

(注3: 54核種を7グループに分け、各グループの放出割合を以下のよ
うに仮定する。

グループ名	放出割合
X e - K r (希ガス) (セゾン)(クリプトン)	1.00
I (ヨウ素) (ハロゲン)	0.45
C s - R b (アルカリ金属) (セシウム)(ルビジウム)	0.67
T e - S b (テルル)(アンチモン)	0.64
B a - S r (アルカリ土類) (バリウム)(ストロンチウム)	0.07
R u (ルテニウム)	0.05
L a (超ウランを含む) (ランタン)	0.009

その結果、100%放出の希ガスを別にすれば、他の6グループの放射能総量の約11%が大気中へ放出されることになる。)

最近の文献(末尾リスト2.)に従つて、被害結果の主なものを示せば、緊急避難を全くしなかった場合、次の通りである。

	(平均)	(99パーセントイル)
急性死亡	3600人	18000人
急性障害	6300 "	41000 "

急性死亡の主な原因は、骨髓の被曝であることはすでに述べたが、その場合、体外からの全身照射の中に占めるヨウ素およびテルル(Te132)の重要性を指摘しておく必要がある。

表の中で、平均とは気象条件について平均した結果を示し、99パーセントイルとは、気象条件によつて、100回に1回はこのレベルをさらに超えることもありうるとの意味であつて、ほぼ最高値とみなして良い。

なお、この場合、前提となる周辺人口分布の概要は次の通り。

0～5マイル 752(人/平方マイル)

5～10マイル 617(人/平方マイル)

10～15マイル 732(人/平方マイル)

この評価結果は、詳しくは112万kw軽水炉の場合に、かつ米国の大都市に比較的近い現実の発電所地点に基づいてなされたものであり、その点で若干の吟味が必要である。

我が国の場合、現実の原子力発電所の周辺の人口について、地点から100kmまでの分布をみると、その平均的傾向は引用したケースの人口分布と良く似ていることがわかる。従つて少なくとも被害の平均値については同様の値がえられるものと予想してよい。

被害の平均と最大との間に大きな開きがみられるのは、例えば風が吹いたまま人口集中地(都市)に向かつていたかどうかにより大きく左右さ

れ、かつ雨の有無に影響されるからであつて、その意味で、最大値の方は現実の立地条件によつて大いに異なることに注意したい。

放射性雲が風によつて流れてくる前に、緊急避難することが出来れば、当然ながら、大幅に被害をまぬがれることができる。その場合、風下と直角の方向に立退くことができれば最も効率が良い。問題は現実緊急避難がどの程度可能かであつて、風下の15kmないし25kmまでの地域の人々を、緊急避難させることは容易でないし、特に夜間などを考えれば尚更である。(注4)

(注4: 急性死亡の現われる範囲は気象条件によつて大幅に異なるが、15~25kmを超えることはないと判断される。)

引用した文献(末尾リスト2.)では、現実性のある緊急避難モデルとして風下10マイルまでの人々が警告後1ないし5時間のうちに立退くと仮定した場合、

	(平均)	(99パーセントイル)
急性死亡	830人	8200人
急性障害	3600*	33000*

となり、とくに急性死亡数の減少が著しい。

さらに、長期的影響に関しては、晩発性の癌による死亡、および長期にわたる土地利用制限(農作物などの土地利用および居住の禁止)が問題であつて、次の通りとなる。

	(平均)	(99パーセントイル)
癌死亡	8100人	24000人
制限距離	19マイル	54マイル
制限区域	76平方マイル	250平方マイル

この推定に当つては、前提条件として、汚染区域からは人々はほとんど移転したものと考えており、従つて癌死亡の主な原因は初めに放射性雲が通過した際に呼吸によつて体内に放射性物質を取りこんだこ

とにあり、それゆえ癌の種類としては肺癌が主体である。

また長期にわたる土地利用制限の最大の原因は放射性セシウム(Cs-137)による地表汚染にある^(注5)。表面の土壌を削りとつたり、汚染されていない土を運んで来て盛つたり、上下に深く耕すとかすれば、その放射線の影響を軽減しうるが、広い地域にわたって実施することは困難である。

(注5: Cs137 の半減期は長く、30年であり、100万kw軽水炉の炉心内蓄積量は 4.7×10^6 Ci程度である。分裂生成物中これに匹敵するものとしては Sr90 があり、その半減期は30年、蓄積量は 3.7×10^6 Ci程度である。しかしながら、炉心溶融時の大気放出の割合が大きく異なる(P.20参照)ことのほかに Cs137 の場合はその娘核種 Ba137 (極めて短い半減期)が強いガンマ線を出すのに対し、 Sr90 の場合はベータ線しか放出せず、したがって体内に摂取されない限り殆ど影響を生じない。

参考文献

大塚幸雄著

放射線と健康

文芸春秋

放射線と健康

文芸春秋

放射線と健康

文芸春秋

放射線と健康

文芸春秋

放射線と健康

文芸春秋

4-4. 補足

原子力発電所が軍事的攻撃を受けた場合を取扱った文献としては、すでにストックホルム国際平和研究所(末尾リスト3.)やカリフォルニア大学・国際戦略問題センター(末尾リスト4.)から発表されたものがある。

この場合、被害の推定に当つては、前者はフォード/マイター報告(末尾リスト5.)から引用しているが、これらはすべてラスムッセン報告の結果に基づいている。

その場合、例えば極めて苛酷な原子炉事故の結果として、次のような数値が引用されている。

急性死亡	3300人
急性障害	45000
甲状腺腫(注1)	240000
癌死亡	45000
遺伝的影響	30000 (30年間に生じる)
汚染区域	3200平方マイル (150年間に生じる)

(注1：甲状腺の場合はヨウ素(及びテルル)が特に好んで沈着するため、大きな線量を受けやすい。しかし、致死率が低く、かつ外科手術によつて処置しやすいこともわかっている。)

また、イスラエルによる攻撃のあと、国連総会の決議に従つて、国連事務総長の任命による専門家グループによる調査報告書(末尾リスト6.)が作成されているが、その中で運転中の原子力発電所が同様の攻撃を受けた場合の重大性に言及しており、この場合もまたラスムッセン報告が基礎をなしている。

放射性物質によつて被害を受ける人の数は、人口分布と気象条件によつて変わり、特に急性死亡数の変動が大きいこと、また降雨の場合には比較的近い距離の線量が高くなること、などが述べられている。

さらに、集団線量としては最悪のシナリオでは 10^5 ないし 10^6 マン・グレ

10⁴ないし10⁵マンレム)となり、何年も経ってから後にそれが原因で、恐らく千人ないし1万人あるいはそれ以上の死亡を招くかも知れないと述べている。

また見逃がしてならないのは、半減期30年のセシウム137によつて広い地域が汚染され、何年にもわたつて居住できなくなること、かつ広大な面積の土地の汚染を除くことは現実には容易でないことに注意を喚起している。

ところで、すでに何度か述べて来たように、被害の推定に当つては、福島スミッセン報告かそれに類する報告に依存していることはまぎれもない事実である。

さらに加へるに、現在進行中の原子炉安全研究では溶融炉心からの放射性物質の大気放出の割合が、原子炉容器内及び格納容器内の雰囲気如何によつて大きく異なるのではないかという見通しが得られつつある。

その検討結果が米国をはじめ世界的に確定するまでには、まだ2、3年を要するものと思われる。

例えば今回引用した資料(末尾リスト2)の中でも、仮りに放出割合が半減した場合の被害の試算がいくつか示されていて、例えば20ページに示された放出割合のうち、希ガスはそのまま(1.0)とし、その他は一率に半減した場合を考えれば、もとのケースと比較して、

	急性死亡	急性障害	癌死亡	制限区域
もとのケース	100	100	100	100
放出率半減	30	35	74	55

となるという(ただし現実性のある緊急避難と移転を前提とした場合)。

最後に一つ注意したいのは、攻撃を受けた後の原子炉施設である。

炉心内に閉じこめられていた放射性物質が格納容器内に解放され、その相当部分が大気中に放散されても、格納容器内にはなお多量の放射性物質が存在している。

その結果、格納容器内側の放射線レベルは極めて高く、事故直後には毎時 10^6 レントゲンかそれ以上にもなると思われ、かつその減衰はゆるやかなものであつて、従つて、事件後の被害状況の調査さえ不可能であり、その後片付けもまた困難を極めるものと考えられる。

5. おわりに

原子力発電施設が万一軍事的攻撃を受けた場合、攻撃側が放射性物質の大量放散を意図して、それに有効と思われる攻撃を実施した場合には、大きな被害が生じうることを理解することができた。

しかしながら、本研究では、時間的制約のため、必ずしも十分な検討ができなかつた事項も残されており、とくに心理的不安に基づく社会的混乱などは全く扱われていない。今後により詳しくかつ広い調査が望まれる所以である。

また、本文に述べたように、炉心が溶けた際の放射性物質の大気放出の割合に関しては、目下、原子炉安全研究の主要テーマの一つとして、米国や西独を中心に追求されつつある段階であり、その結果如何によつて影響される余地が残っている。

なお付言すれば、近来、米国や欧州では原子力施設に対する破壊工作(サボタージュ)の危険が重視される傾向にあり、そのための対策強化がはかれるものと予想されるが、それらは軍事的攻撃に対しても有効な働きをする面があるものと思われる。

参考文献

1. USNRC (米国原子力規制委員会);
Reactor Safety Study - an Assessment of
Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear
Power Plants, WASH-1400 (NUREG-75/014),
October 1975
2. D.C. Aldrich, et al., Technical Guidance for
Siting Criteria Development, NUREG/CR-2239,
SAND 81-1549, December 1982
3. Stockholm International Peace Research
Institute, Nuclear Radiation in Warfare,
Taylor & Francis Ltd., 1981
4. B. Ramberg, Destruction of Nuclear Energy
Facilities in War, D.C. Heath and Company,
1980
5. S.M. Keeny, Nuclear Power Issues and Choices,
Ford/Mitre Report, Ballinger, 1977
6. United Nations, A/38/337, Study on the
consequences of the Israeli armed attack
against the Iraqi nuclear installations
devoted to peaceful purposes, October 1983

附 録

A イスラエルによる原子炉施設爆撃

1981年6月7日、日曜日、イスラエル空軍は、F15戦闘機6機に護衛されたF16爆撃機8機によつて、イラクの原子力研究センターを急襲した。

同センター(Tuwaittha Nuclear Research Centre)は、バグダッドの南々東約25kmのところにある。

イラクは核兵器不拡散条約に加盟しており、同国の原子力活動は国際原子力機関(IAEA)の査察下におかれている。

国連の調査報告¹⁾に基いて、同センターと被害の状況を要約しよう。

このセンターでは、すでに研究炉1基(IRT-2000、ソビエト製、プール型軽水減速型研究炉)が1967年から運転されており、その熱出力は当初2MW、1979年に5MWに引き上げられた。燃料の濃縮度は初め10%、その後36%、そして出力増強時に80%に変えられ、その80%濃縮ウラン量は約15kgである。

この研究炉と同じ区域に天然ウラン、劣化ウラン、およびイエローケーキが貯蔵されていた。

この研究センターに新たに二つの研究炉が設置され、一つはTammuz-1(タンク・プール型、40MWの材料試験炉)、いま一つは、Tammuz-2(プール型、500kw)であり、二つの原子炉はともにフランス製であつて、同国のもつ研究炉(OsirisとIsis)のコピーである(ただしOsirisは70MW)。

原子炉建物の設計もまたフランスのものと類似していて(図A)、一つの建物の中に二つの原子炉が置かれてあり、二つの原子炉の間にはホット・セルがある。Tammuz-2(Isis)はTammuz-1(Osiris)の炉心モック・アップであつて、燃料体を一方の原子炉から他方へ移すことや、試験用燃料体をホット・セルに移すことができる設計になっている。

イスラエル空軍による爆撃はこの原子炉建物に対して行われ、国連報告によれば、少なくとも3個の爆弾が命中した。その一つは中性子ビームホールに当たったが、そこにはまだ実験設備がそなえつけられていなかった。

最初の1個は、Tammuz-1の格納容器に命中して穴をあけ、次の1個がその穴から飛び込んで中で爆発した。格納容器および上部の床の大部分が原子炉タシク中に落下した。格納容器内部の各種設備は、原子炉タシクを含めて、修理不能なまでに破壊された。制御室も破壊され、そこには死者(1名)は死亡した。再建には少なくとも5年を要する。

この爆撃による死者は3名、ただし1名は後片付け中の爆発による。亡命中1名はフランス人技師であつた。

なお、ホットセルおよびTammuz 2の付近は一部損傷を受けた程度である。

この原子炉建物の近くにある事務棟や研究棟も被弾した。

燃料に関しては、Tammuz 1 および 2 のための燃料棒39本がすでにフランスから供給されていた(93%濃縮ウラン、12kg)。そのうちの1本は新しい建物の原子炉室の棚にあり、残りの38本は照射済でTammuz 2 のプール内にあつたが(注: 転用防止の目的での照射と判断される)、被害はなかった。

これらの燃料体は本格的な使用以前であつたので、仮りに破壊されていても、ごく近辺を除いて放射能汚染が問題になることはなかったと思われる。

なお、同じ国連報告書によれば、同センターにはPWR用の燃料製造実験設備(UO_2 燃料数百kg/年の規模)や放射性廃棄物取扱設備などもあつた。

この攻撃をした側のイスラエルについては、核兵器不拡散条約に参加せず、かつ自国の重要な原子力活動に関してはIAEAの査察を受け入

れておらず、しかもすでに秘かに核兵器を保有しているのではないかと
いう噂もある国であつて、今回の攻撃に対しては、国連およびIAEAの場
において厳しい国際的 비난を浴びたことは周知のところである。

これに対して、イスラエル側の資料²⁾によれば、同国はイラクが核兵器
を製造保有する意図があるものと強く主張しており、またIAEAの査察
についても全く信用を置いていない。

同国では、イラクの意図を裏付ける主な根拠として、(1)かつてプルト
ニウム生産用黒鉛炉をフランスから購入しようとした。但し実現せず。
(2)研究炉は強力な材料試験炉であり、発電用原子炉の自力開発計画のな
い国にとって、極めて奇妙な行動である。(3)燃料として比較的濃縮度の
低い“カラメル”型燃料を受け入れず、92%の高濃縮ウランの入手に固
執した。フランスは70kgを供給する約束をしている。(4)別に天然ウラン
約250トンを購入したが、プルトニウム生産以外に用途が考えられな
い。(5)プルトニウム分離技術取得のための動きがみられる、などを挙げ
ている。

攻撃の主目標となつた研究炉(Tammuz-1、別名Osiraq)について
も、その出力は公称の40MWと異なり、フランスのOsirisと同様に70MW
であると推測しており、材料照射の代わりに天然ウランないし劣化ウラ
ンを照射することによつて、年間7~10kgのプルトニウムが生産しうる
ものとイスラエル原子力委員会は見積つている。

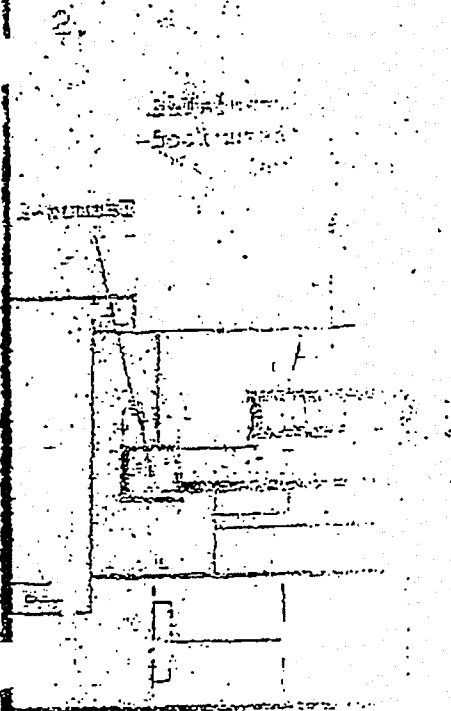
こうしてイスラエルは、今回の行為は自国の生存のため^たにとつもので
あると主張しており、イスラエルとアラブ間の不信の根深さを改めて知
らされるところである。

最後に今回の攻撃について伝えられるところを若干記述しておこう。

イスラエルは2年前から攻撃を計画し、1980年9月には航空偵察を行
い、その写真に基いて、砂漠に実物大の研究センターの模倣建物を作
り、数カ月わたつてパイロットの訓練を重ねたと伝えられる。

攻撃の実行は1980年11月から数回にわたって延期され、ついに 81年 6月 7日に行われた。同日は日曜日であつたが、それは150人にのぼる外国人技術者の不在を考慮したためと伝えられる。

攻撃に当たっては、8機のF16のうち、2機がそれぞれスマート爆弾(誘導型爆弾)2発を投じ、他はそれぞれ1トン爆弾2発を投じ、この間の所要時間は約2分であつたと伝えられる。



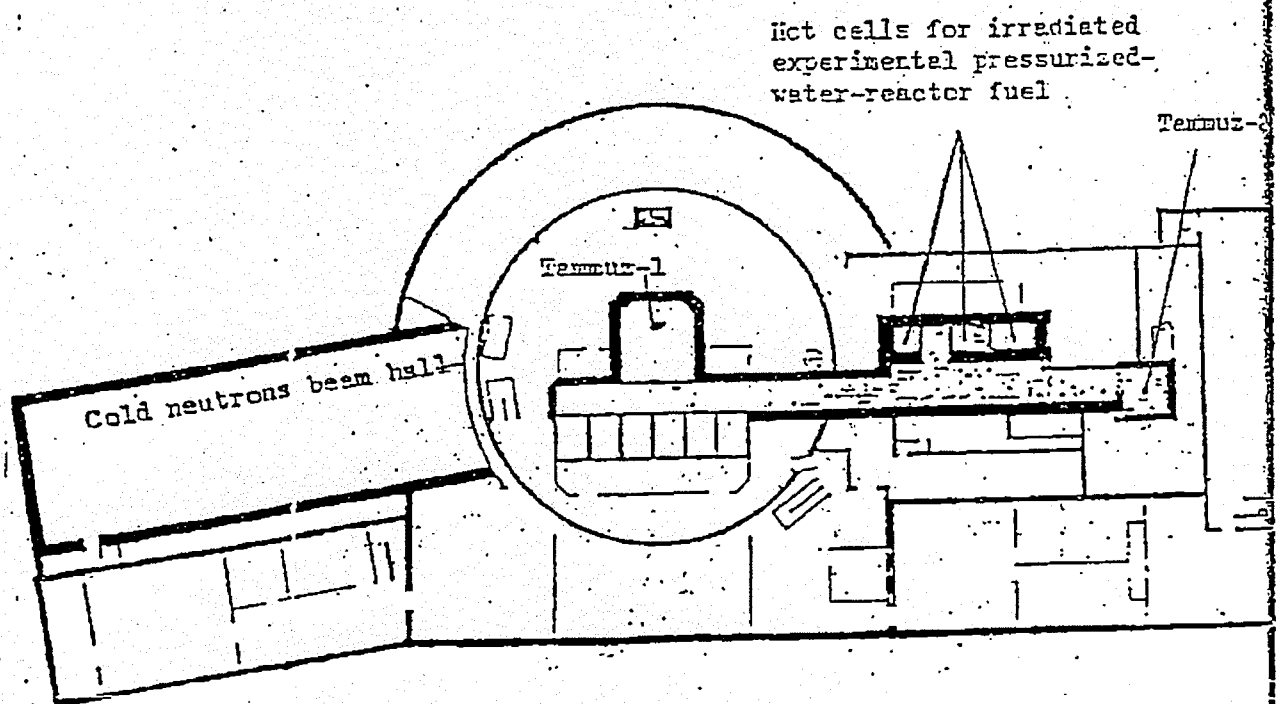


図 A. 爆撃を受けた原子炉建物

(文献¹⁾より)

参考文献

1. United Nations, A/38/337, Study on the consequences of the Israeli armed attack against the Iraqi nuclear installations devoted to peaceful purposes, October 1983
2. S. Fel'dman, The Bombing of Osirac—Revised, International Security, Fall 1982 (Vol. 7, No. 2)

B 放射線影響

放射線が人体に及ぼす影響については、すでに報告書本文（4-2節）で簡単にふれたところであるが、ここではその問題についてやや詳しく解説することとする。

1. 放射線影響の種類

放射線影響には、大別して、放射線を受けた個人又は集団に発現する影響（身体的影響という）と、その子孫に発現する影響（遺伝的影響）とがある。前者の身体的影響については、その発現の時期によつて二つに大別することが出来る。一つは被曝直後、例えば、60日程度の範囲で症状があらわれる急性障害と、何年もたつてから影響があらわれる晩発性障害とである。

2. 全身外部被曝による急性障害

全身被曝で、 1 Gy （ $=100\text{ rad}$ ）未満の線量を一時に受けても、大人の場合は重大な結果にはならないが、乳幼児の場合は健康障害を起こすことがある。

1ないし 2 Gy の全身照射では、大人の場合吐気を催し、嘔吐することもある。 2 Gy 以上になると総ての人は、年令、健康状態、その後の治療の程度に応じて、何らかの症状を呈する。

一方、極めて大きな線量、例えば $20\sim 30\text{ Gy}$ になると循環系及び中枢神経系に重大な障害を生じ、数日、または数時間以内に死に至る。

英国の調査¹⁾では、空中線量 450 R では50%の人が60日以内に死に至る（これを $\text{LD}_{50/60}$ または単に LD_{50} と書く）。このときの人体の中央深部線量は 3.2 Gy に相当する。さらに $500\sim 600\text{ R}$ （中央深部線量は 4.3 Gy 以下）では90%の人が死亡する。中央深部線量 4.6 Gy では全員が死に至る。その主要な原因は骨髓の被曝による。

被曝線量が3乃至 6 Gy の被曝者に対しては適切な救急医療によつて救うことが可能な場合がある。即ち、そうすることにより LD_{50} の値を

数Gyに上げることが出来る。しかし、10Gy以上の被曝者に対しては医療処置を行っても殆んど効果がない。

西独のリスク評価²⁾に於いては、人口集団のうち10%は種々の健康状態に起因して放射線の感受性が高い人々であると考え、その場合の致死線量を3.4 Gyにとっているが、その他の一般の人々に対しては、LD₅₀及びLD₀₁の値として、被曝後の医療処置の効果を考慮に入れて、それぞれ5.1 Gy及び7.7 Gyとしている。

また米国の報告³⁾では、LD₅₀は同じく5.1 Gyであるが、LD₀₁は6.5 Gy程度としている。

3. 連続被曝の場合の影響

以上の考察は、事実上瞬間に被曝した場合のものであるが、同一線量でも、低い線量率で長い時間かかって浴びた結果の場合には、その影響は少くなる。その関係を示す一応の目安として下表を示す。⁴⁾

医療処置	線量(Gy)		
	1週間	1ヶ月	4ヶ月
不要	1.5	2.0	3.0
若干必要(殆ど死亡せず)	2.5	3.5	5.0
大いに必要(半数死亡)	4.5	6.0	—

4. 内部被曝による急性障害

放射性物質を吸入あるいは経口摂取することにより胃腸管が被曝する。またヨウ素によつて甲状腺が、またストロンチウム(Sr)などにより骨質等が被曝を受ける。しかしこれらの被曝による急性障害のリスクは、ここで検討している問題では、体外からの放射線による全身被曝による障害に比較して小さい。その場合、骨髓以外の臓器では障害の発生する線量の水準が高く、例えば50%の人が肺に障害を生じるレベルは、45Gyと考えられる。⁵⁾

5. 個人に現われるその他の障害

3 Gy以上の線量を受けると脱毛現象が現われる。2 Gy以上のX-線又は γ -線線量では白内障が生ずる。しかし、長期に亘る被曝の場合にはこの線量レベルは高くなる。

妊娠中の胎児の照射による影響は、妊娠の時期によつて放射線感度と現われ方が異なる。

胎児期を3つの時期に大別すると、着床前期に照射を受けると着床不能となることがあり子宮内死亡となるが、妊娠が自覚されていない時期なので、実際には影響としては分っていない。

胎芽期は、受精後2週間から8週間ぐらいの間で、最も感受性が高く、奇形の発生が起こる。この影響は非確率的性格であるという説が有力で、しきい値は0.1 Gyとされている。また、0.05 Gyという説もある。しきい値が0.1 Gyとすれば、皮膚線量は0.17 Gy程度になろう。

それ以降の胎児期の影響は、発がんと遺伝的影響であり、これは大人の場合と同じと考えてよい。

睾丸を局所的に照射すると、4 Gyの線量で一時的生殖不能になる。しかし、永久不能を生ずるのは8 Gyを必要とする。卵巢に3 Gyの線量を与えると一時的不妊を生ずる。

6. 集団に対する低線量効果

これにはガンの発生と遺伝的影響を考える必要がある。しかしながら、今までに得られている統計的直接的証拠からみると、人間集団の大きさは線量と効果の曲線が正確に組立てられるほどには充分大きなものではない。

6-1 ガンの発生

強直性脊椎炎患者、放射線作業従事者、広島・長崎の原爆被曝者等に発生するガンの統計およびこれを補うものとして動物実験の結果等を、各国は、力を入れて検討している。

UNSCEAR(放射線影響に関する国連科学委員会)はこれらを基に、個別臓器ごとのガンのリスク係数を出し、それらを包括したリスク係数を出している。その値は man-Gy あたり 10^{-2} である。この意味は10万人の集団が1 mGyを被曝すると、それによる各種のガンの発生総数は10人である。またその統計的不確かさの大きさもこの値と同じ程度である。またICRP(国際放射線防護委員会)はこれより少々保守的な値を採用していて、 man-Sv あたり、 1.25×10^{-2} としている。(1 Sv=100レム)。

このリスク評価は、かなりの高線量で高線量率の場合に得られた値を低線量域へ直線的に外挿したもので、低LET-放射線(γ 、 β -線)に対しては保守的な値になっていることはほぼ確かである。

そこで米国の評価⁹⁾ではリスク係数を $1.22 \times 10^{-2} / \text{man-Sv}$ とするが、線量率が低い場合はリスクが低下すると考えて、0.01 Sv/日以下では0.2を、0.01~0.1 Sv/日では0.4を掛けて評価している。

6-2. 遺伝

遺伝的影響の実験的研究は人間については不可能であるので、大部分はマウスの実験によるものである。UNSCEARによると、10万人の人口集団で遺伝的有意線量1 Gyあたり、遺伝欠陥の生ずる数は20000としている。これも高線量率の場合から低線量率の場合への直線的外挿であるから恐らく高すぎる値を示すことになる。標準的年令分布をもつ人口集団では、うける線量のうち約40%だけが今後子供を産む可能性をもつ人達に関係するから、この実際の人口集団における遺伝欠陥の発生する割合は $8 \times 10^{-3} \text{Gy}^{-1}$ となり、これが後の世代に亘って現れる。この数値は致死ガンの発生割合の $\frac{2}{3}$ であり、子供と孫だけに限ると更にその割合は半分になり $4 \times 10^{-3} \text{Gy}^{-1}$ となる。

7. 付言

放射線の人体への影響に関しては、国際的に共通した理解が進んで

いる。しかし各種の影響に関する線量レベルの決定の点では、各国あるいは各機関によつて判断に若干の相違がみられるのが現状である。

参考文献

1. The radiological effects of nuclear war -
Report of a British Institute of Radiology
Working Party, British Journal of Radiology,
Vol. 56, No. 663, March 1983
2. A. Bayer et. al., Basic Aspects and Results
of the German Risk Study, Nuclear Safety,
Vol. 22, No. 6, 1981
3. USNRC, Reactor Safety Study, WASH-1400,
October 1975

C. 大気拡散

気体ないし微粒子状の放射性物質が大気中に放出されたあと、それを含んだ空気の塊り(放射性プルームまたは放射性雲)は風によつて風下に移動しながら、上下左右に拡がつていく。この大気拡散の様相は、その時の気象条件によつて大きく異なり、とくに風向、風速、大気安定度(後述)、および降雨に関係する。また地表からの放出高さや、地形によつても影響される。

我が国では発電用原子炉施設の平常運転時および想定事故時における被曝線量評価の目的で、大気拡散の解析方法が指定されている(発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針について、昭52.6.14、原子力委員会; 同、昭57.1.28、原子力安全委員会)。

評価のための基本拡散式は平坦な地形を仮定し、かつ問題とする時間の間、気象条件は定常と仮定される。

(注: 現実には、風向の変動によつて拡散は助長され、また大気安定度の変動によつて結果は平均化される傾向にある。)

定常な放出源 Q (Ci/sec)により地表高 H (m)から放出される場合、その風下方向 x (m)、水平横方向 y (m)、鉛直方向 z (m)における放射性雲の濃度 $X(x, y, z)$ (Ci/m³)は、ガウス分布の形で

$$X(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

と表わされる。ただし U は放出高さにおける平均風速(m/sec)、 σ_y および σ_z は水平および鉛直方向の拡がりのパラメータ(次元: m)であつて、その値が大きいほど良く拡がる。

(注: 地面より下には拡散しえないので $\partial X / \partial z \big|_{z=0} = 0$ でなければならない、それゆえ数式上 $z = -H$ のところに鏡像源が現われる。)

念のため、上式を y と z について積分すれば、任意の $x(>0)$ において

$$U \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_{-\infty}^{\infty} dz X(x, y, z) = Q$$

となり、風向に直交する空間断面を通過して毎秒 Q だけの量が風下に移動していることがわかる。

なお、放射性物質の場合は放射性崩壊によって次第に減衰していくが、そのことは評価作業の最終段階において核種ごとに考慮するのがふつうのやり方である。

ところで上述の基本拡散式はまた、瞬時放出の場合に、総量 $Q(Ci)$ の放出に対して、ある点の放射性雲濃度の時間積分値 $X(Ci \cdot \text{sec} / \text{m}^3)$ を表わすものであることがわかつている。

また、 $X / Q(\text{sec} / \text{m}^3)$ は相対濃度あるいは希釈率とよばれる。

大気拡散の生ずる原因は空気が上下左右にいれまじることにあるが、この場合、温度差にしたがつて密度差による上下方向の混合がとくに重要である。地表の影響で下の方の空気ほど暖かい場合には不安定であつて拡散が激しく、逆の場合(温度でい減状態)は安定であつて拡散はゆるやかである。これを大気安定度と称し、極めて不安定なケースAから、極めて安定なケースFまで、6つのケースに分類する(Pasquillの方法)。

拡がりのパラメータ σ_y および σ_z は風下距離 x の増加につれて増大するが、つねにAケースで最大であり、Fケースで最小であつて、その算出法は指針に示されてある。ここでは参考のため、2、3を例示すれば、

拡散のパラメータ (m)	大気安定度	風下 1 km	風下 10 km	風下 100 km
σ_y の算出する場合	A	169	1360	10200
	F	34	271	2030
σ_z の算出する場合	A	768	1000*	1000*
	F	14	47	92

* 上空高く無限に拡散することはないので、 σ_z の

上限値を1,000 mとする。

であり、B～Eのケースでの値はAとFのケースの間におさまる。この表からわかるとおり、大気安定度による拡散の難易の相違は水平方向よりも鉛直方向で顕著である。

原子力発電所では環境調査の段階から気象観測を実施して年間の気象統計をとっている。地上風速および天候と大気安定度との間には相関がみられ、我が国の場合は観測上の便宜を考慮して日照量および夜間の放射量(ふく射量)を規準にして分類している(指針参照)。しかしここでは読者の理解のために欧米に多くみられる分類を参考のために掲げておこう。

地上風速 (m/sec)	昼 間 日 照			夜 間 雲 量	
	強	中	弱	薄曇又は 雲量過半	雲 量 少
2 未満	A	A-B	B	—	—
2	A-B	B	C	E	F
4	B	B-C	C	D	E
6	C	C-D	D	D	D
6 以上	C	D	D	D	D

なお雨の場合はほとんどDである。

以上述べた基礎知識に基いて必要な線量評価を行うために次のような作業を行う。

第一に、放射性雲の通過に伴って、放射性雲から出るガンマ線による地表近くの線量(空中線量; 単位レントゲン)を求める。そのためには、上述の基本拡散式によつて与えられた放射性雲濃度から、放出ガンマ線のエネルギー量を求め、その点から地表の問題の地点までの距離に応じた減衰係数を乗じ、その結果を空間的に積分することによつて得られる。そのための計算コードおよび分布図はすでに日本原子力研究所において整備されてある。

第二に、放射性雲の通過する間に呼吸によつて人体内にとりこまれる放射能の量を見積る必要がある。

ふつう人間の呼吸量は活動中と休息中で相違するが、標準的な呼吸量を設定して、地上近くの放射性雲の濃度の時間積分値に乗ずれば、呼吸によつて摂取される放射能の総量が求められる。

第三に、放射性雲の通過に伴つて、その中の微粒子状放射性物質の一部が地表に付着し、すなわち地表が放射能によつて汚染するが、その程度を見積る必要がある。

考えられる微粒子状物質の大きさはミクロン程度であるため重力で落下するよりはむしろ熱運動によつてたまたま地表に衝突し付着するものと考えられる。したがつて、($z=0$) 地表における放射性雲濃度 $X(x, y, 0)$ にある係数を掛けることによつて、付着(沈着)量を求めることができる。

雨の場合には、放射性物質が雨粒にとけ、あるいは付着して落下するので放射性雲濃度を鉛直方向に積分した形になる。そのため一般に沈降する割合が大きく、逆に遠方まで運ばれる割合が減少する。

最後に、大気拡散の實際を具体的に理解する目的で以下に試算例を掲げることとする。

何年にもわたる地表の放射能汚染の主な原因は放射性セシウム(Cs-137)にあることはすでに本文に述べた。100万kw級軽水炉の炉心内にはおおよそ 4.7×10^6 Ci程度蓄積されており、炉心溶融を伴う事件によつて、その何分の一かが大気中に放出される。最大の放出割合としては、文献によつて差があり、今のところ30%~67%と仮定されている。そのことを考えに入れ、また代表的な気象条件を選んで、ここでは下記のような状況を仮定した。

大気放出放射能 2×10^6 Ci(Cs137)

放出高 20m

大気拡散条件 4 ケース

a) A 風速 1 m 雨なし

b) D 風速 5 m 雨なし

c) F 風速 2 m 雨なし

d) D 風速 5 m 雨

雨のない場合、地表の沈着放射能濃度 X_0 (Ci/m²)と大気中放射性雲濃度の時間積分値 X (ci·sec/m³)の関係は、既述のとおり

$$X_D(x, y) = V_D X(x, y, 0)$$

で与えられ、沈着速度 V_D (m/sec)は、微粒子状物質の物理化学的性質と地表の性状から定まる。ここでは平均的な値として

$$V_D = 10^{-2} \text{ m/sec}$$

と仮定する。

雨の場合は、地表の沈着放射能濃度 X_R (Ci/m²)は、

$$X_R(x, y) = \frac{\Lambda Q_0 e^{-xz/u}}{\sqrt{2\pi} \sigma_y u} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}}$$

で与えられる。この結果は、基本拡散式による放射性雲濃度が、雨によつて Λ (Sec⁻¹) の割合で洗い落されると考えることによつて導かれる。ただしこの場合の沈降量は大きいので、任意のX点における風向直交断面を通過する放射能量は放出時の量Q₀ではなく、 $Q_0 \exp [-\Lambda x / U]$ までに減少していることに注意したい。(同様に、雨でない場合でも $\Lambda x = \Lambda$ 風下距離の大きいところでは沈着による減少の影響を考慮すべきである。)

なお、ここではやや強い雨を想定して、浄洗係数 $\Lambda = 1 \times 10^{-3} / \text{sec}$ と仮定する。

上記の条件に従い、地表沈着のCs137濃度の算出結果を図に示す(図C)。

図に見るとおり、同じ放出量でありながら大気の状態によつて地表の汚染状況は大幅に相違することがわかる。

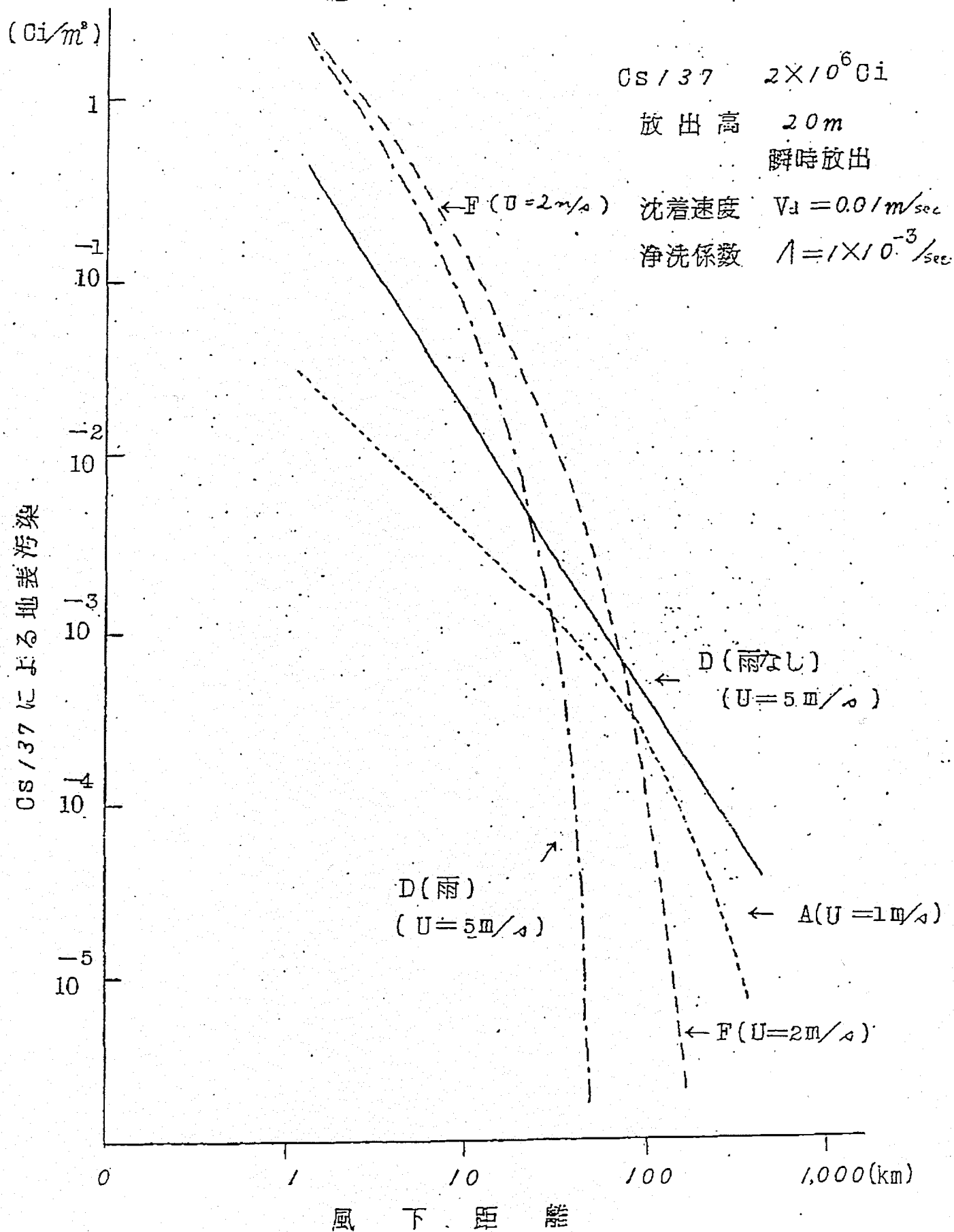
広い地域が仮りに $10^{-3} \text{Ci} / \text{m}^2$ のCs(セシウム)137で汚染しているとす[これは表で述べる遮蔽効果を0.5として、地表近くの空中線量は、 $5.4 \times 10^{-3} \text{R} / \text{hr}$ と見積られる。

この空中線量のところにいる人間の体内の深部にある臓器(骨髓)が受ける被曝量は矢路 $3.8 \times 10^{-3} \text{rem} / \text{hr}$ である。したがつて30年間に受ける線量は、Cs137の半減期を考慮に入れて720remに達する。

土地の表面は一般に凸凹があるので地表から発する放射線の一部は土によつて遮られる。また建物の中にいる人に対しては、床や壁が若干の遮蔽効果をもつ。それらを考えに入れて0.5(半減)と仮定した。さらにまた、風化作用によつて地表に付着したCs137は次第に失われ、またある程度の深さまで地中に浸透することにより、土壌による放射線遮蔽効果も増加する。

なこれらの効果があるため、上述の計算結果は上限を示すものと考えられる。

図C 放射性セシウム(^{137}Cs)の放出による
地表汚染



D 人口分布

放射性物質の大気放散による人的被害を算定するには、当然ながら、放出源の周囲の人口分布を知る必要がある。

我が国の原子力発電施設の場合、主として国勢調査に基づいた人口分布の算定結果がすでに報告されており(原子力発電便覧、通産省編、'82年版、原子力新報社)、100kmまでの人口が図表になって示されている(図D1)。

いま仮りに直線的海岸の傍に立地した場合を考え、かつ人口密度が一樣である場合には、半径R(km)までの人口P(人)は

$$P = D \cdot \frac{\pi R^2}{2} \sim 490R^2$$

となる。ここにDは人口密度であり、我が国の平均人口密度は311人/km²(理化年表、58年版)である。

図D1に示されている現実の人口分布を見て、おおよそ平均的と思われる直線を試みに示せば、

$$P_A = 40 \pi R^{2.3} = 125 R^{2.3}$$

となる。これは、現実の原子力発電所がいわゆる過疎地帯を選んで設置されている事実を裏づけている。

報告書本文において人的被害に関して引用した文献(本文末尾リスト2.)の場合には、米国の現有の原子力発電所を対象とし、とくにインディアン・ポイント地点を対象とした算定が中心をなしている。

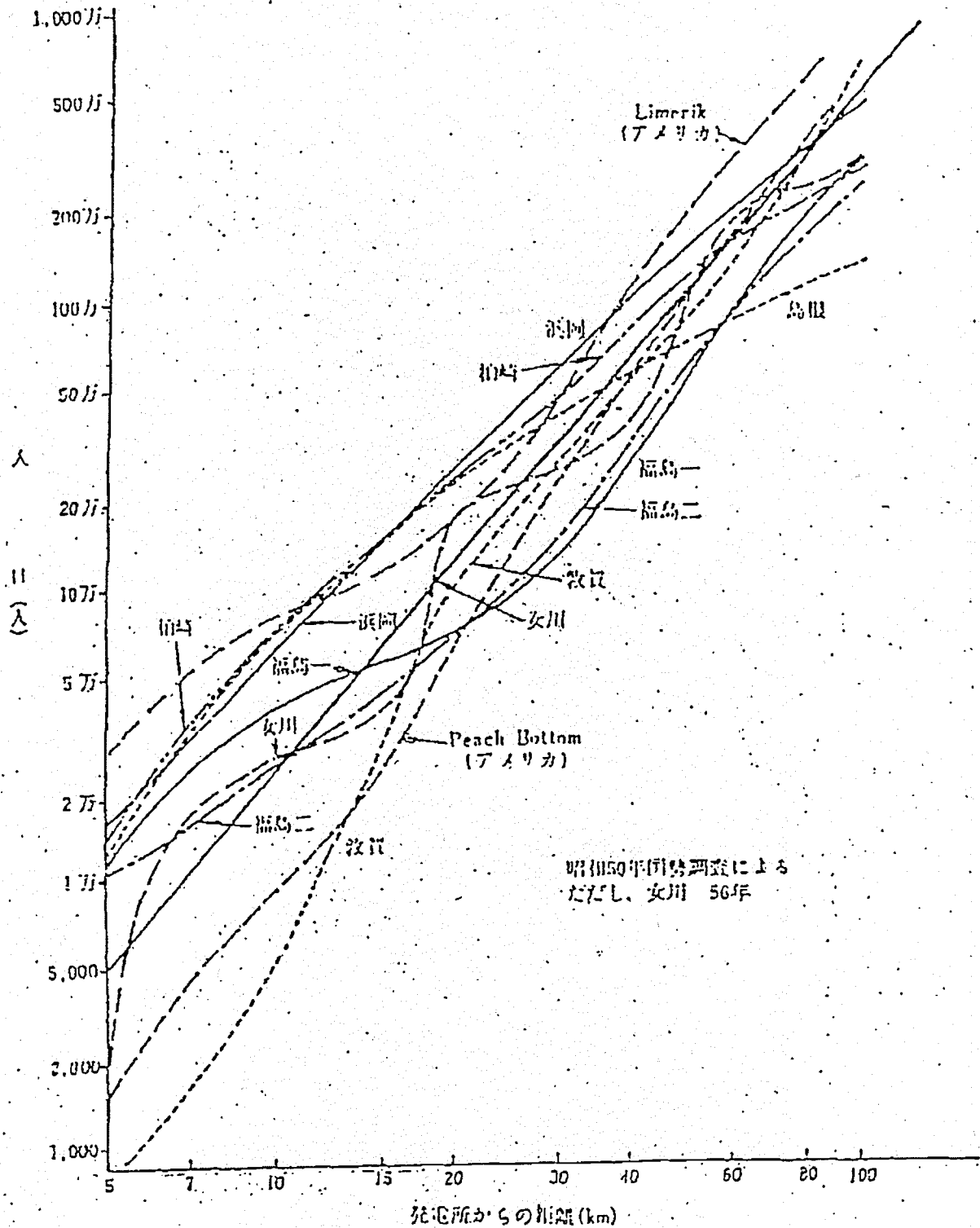
そのために、試みに上述の我が国の場合の平均式とインディアン・ポイントの周囲の人口分布を比較してみる(図D2)。

インディアン・ポイントの場合にはニューヨーク市の存在によつて30ないし50マイルのあたりに人口のふくらみが見られるものの、全体とし
(この図をみれば)

ては相似しているといえよう。

なお、報告書本文においてすでに述べたとおり、放射性物質の大気放出に伴う人的被害の様相は、その時点における気象条件に大きく影響され、かつ人口の集中あるいは分散の形によっても変化するのであるが、気象条件に関して平均した結果については逆に地点毎の影響は予想以上に小さいことも知られている。

その1. (BWR)



図D / 原子力発電所周辺の人口 (図中の直線は $P = 1.25 R$ を
試みに書入れたもの)

その2 (PWR)

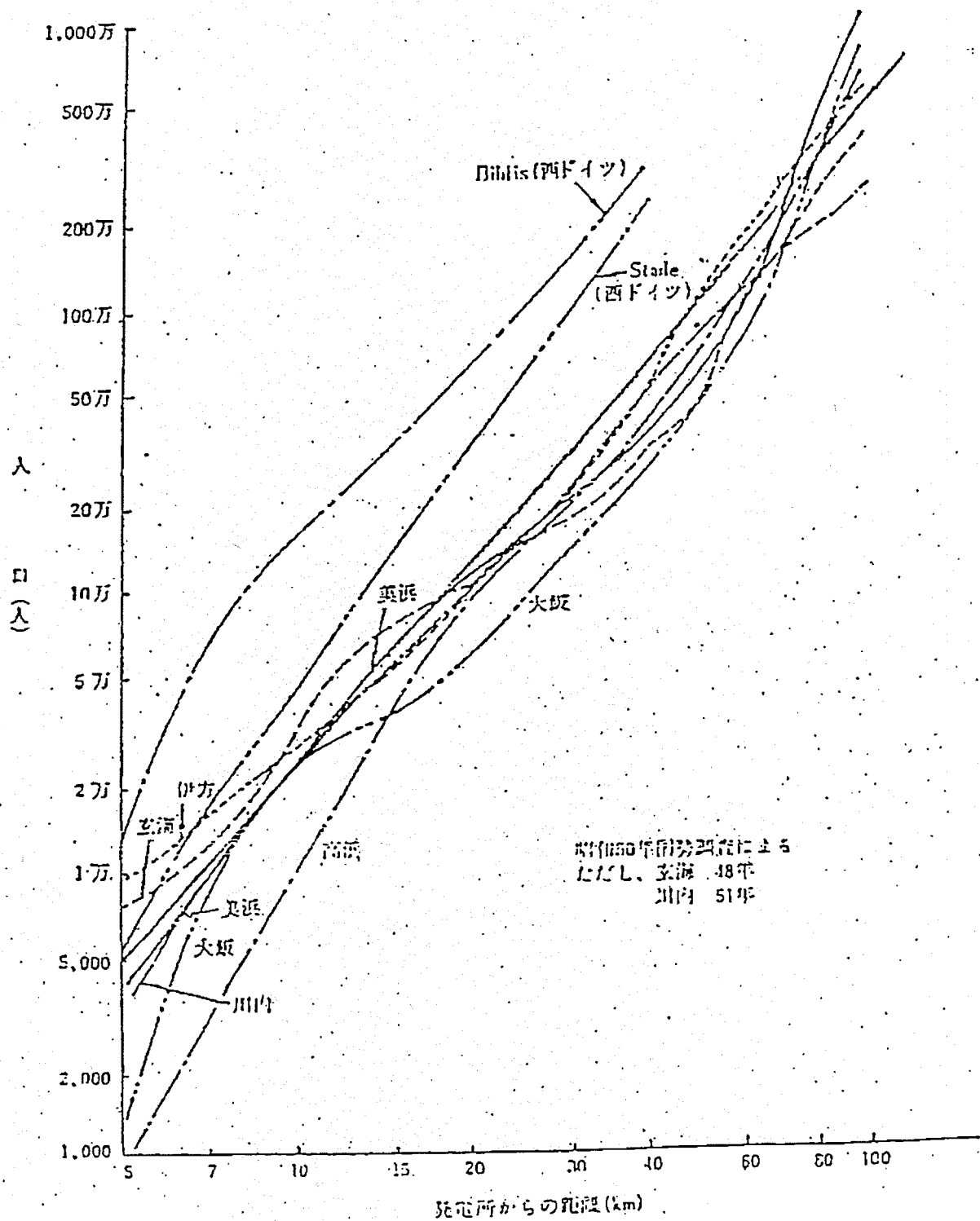
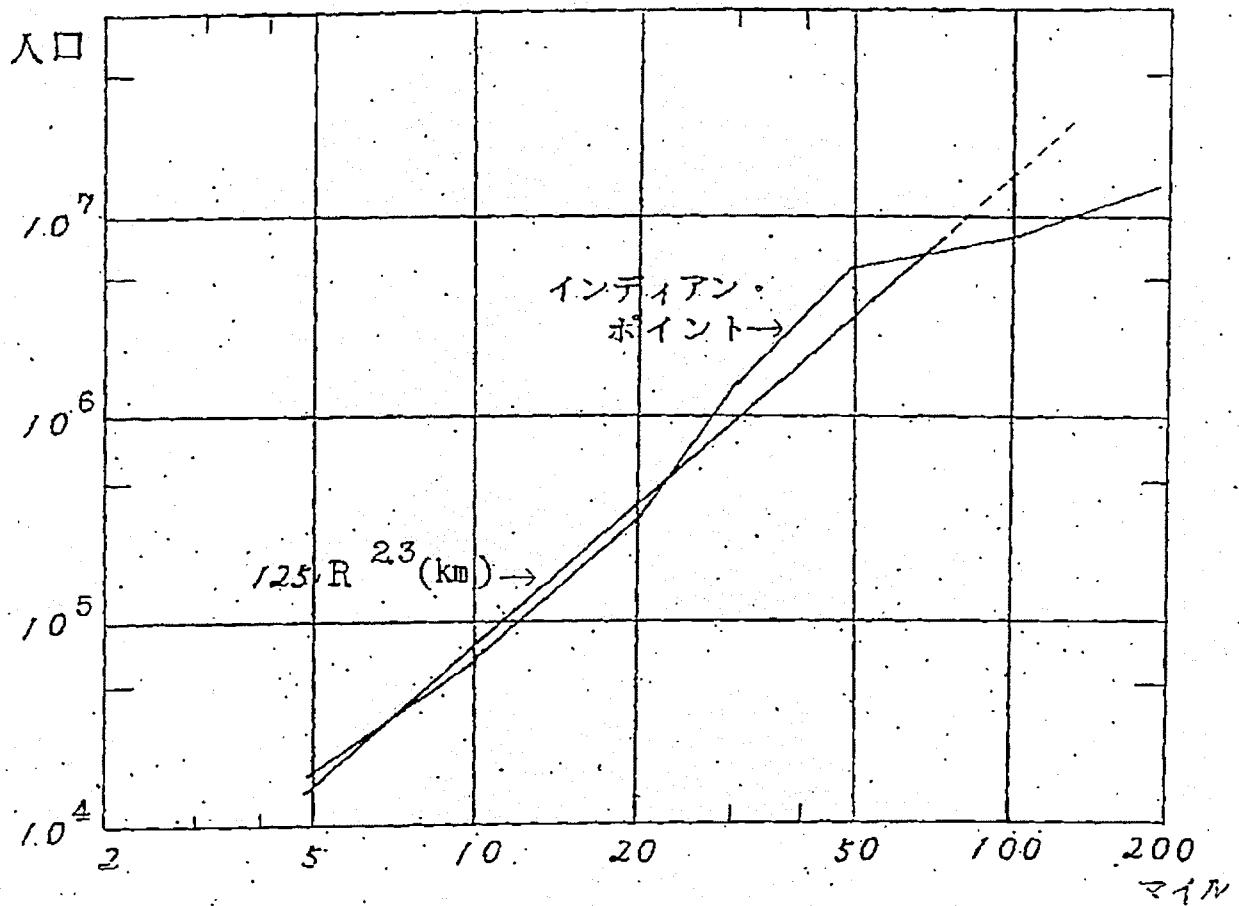


図 D 2 人口分布の比較例



注: $P = 1.25 R^{2.3}(\text{km}) = 375 R^{2.3}(\text{マイル})$

E 原子力発電概説

〈原子炉の種類〉

〈原子力発電所内の諸設備〉

〈軽水炉のしくみ〉

〈非常用炉心冷却系のしくみ〉

〈世界の原子力発電状況〉

〈用語解説〉

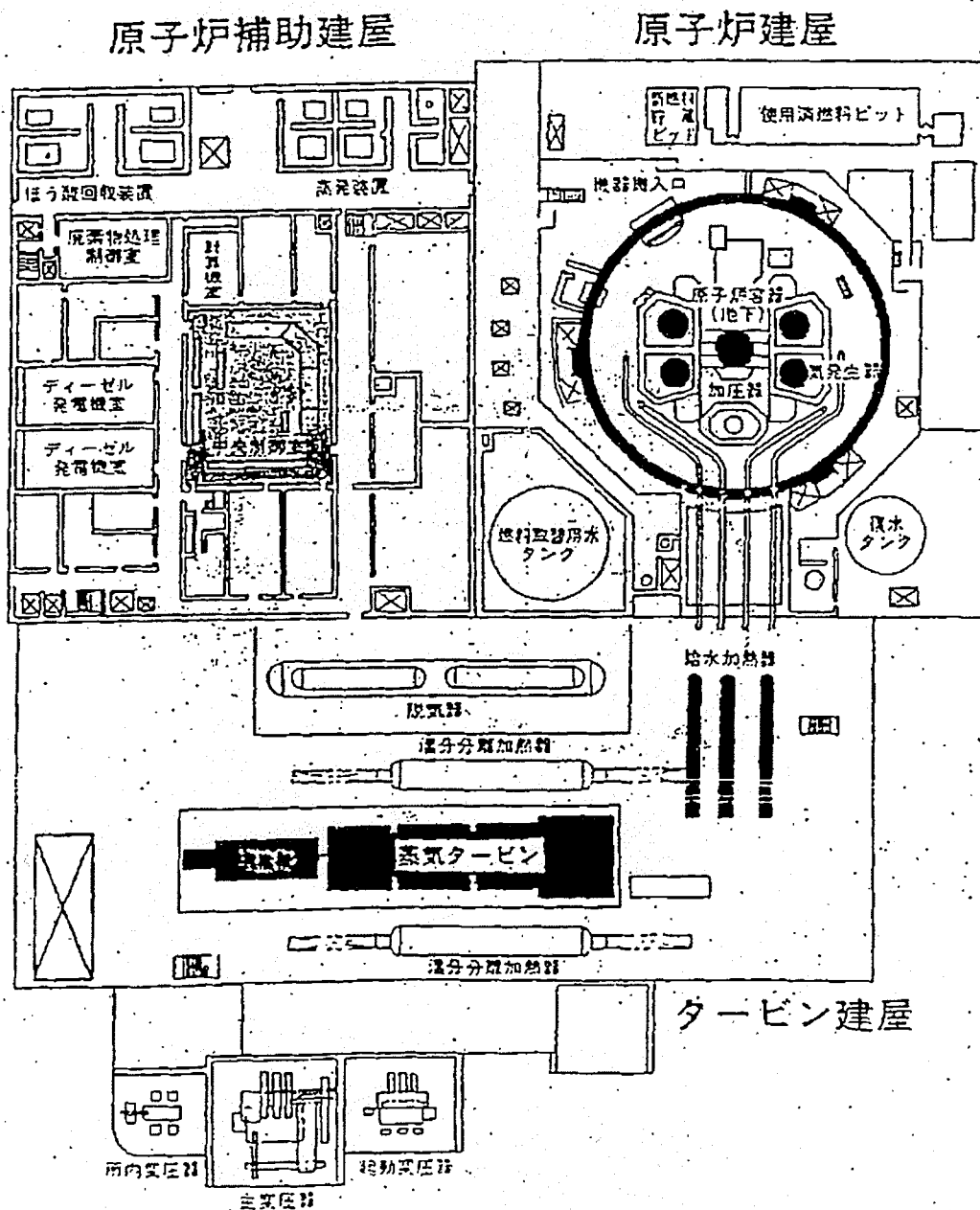
＜原子炉の種類＞

原子炉の種類		燃料	減速材	冷却材
軽水炉	沸騰水型 (BWR)	濃縮ウラン	軽水	軽水
	福島第一原子力発電所、浜岡原子力発電所等、我が国では、東北・関東・中部地方に主として建設されており、世界的にも広く採用されている。			
	加圧水型 (PWR)	濃縮ウラン	軽水	軽水
ガス炉	美浜発電所、伊方発電所、玄海発電所等、我が国では、関西以西に主として建設されており、世界的にも広く採用されている。			
	ガス冷却炉 (GCR)	天然ウラン	黒鉛	炭酸ガス
	日本で最初の実用発電炉として東海発電所で採用された。英国で開発されたもの。			
	高温ガス炉 (HTGR)	濃縮ウラントリウム	黒鉛	ヘリウム
重水炉	発電ばかりでなく、製鉄など多目的利用が可能な原子炉である。日本原子力研究所で現在開発中であり、海外では西独や米国で開発が進められている。			
	軽水冷却型	濃縮ウラン又は プルトニウム添加 天然ウラン	重水	軽水
		動力炉・核燃料開発事業団が新型転換炉原型炉「ふげん」(165万KW)を開発し、運転中である。英国でも同型式の炉(SGHR)を開発した。		

	重水冷却型	天然ウラン	重水	重水
	カナダで開発され (CANDU)、日本でも導入へ検討がなされている。			
高速増殖炉 (FBR)	液体金属冷却型	プルトニウム	なし	ナトリウム
	動力炉・核燃料開発事業団で開発中。実験炉「常陽」は運転中。原型炉「もんじゅ」も建設中である。フランス、英国、西独、米国、ソ連など、世界的に開発中。			

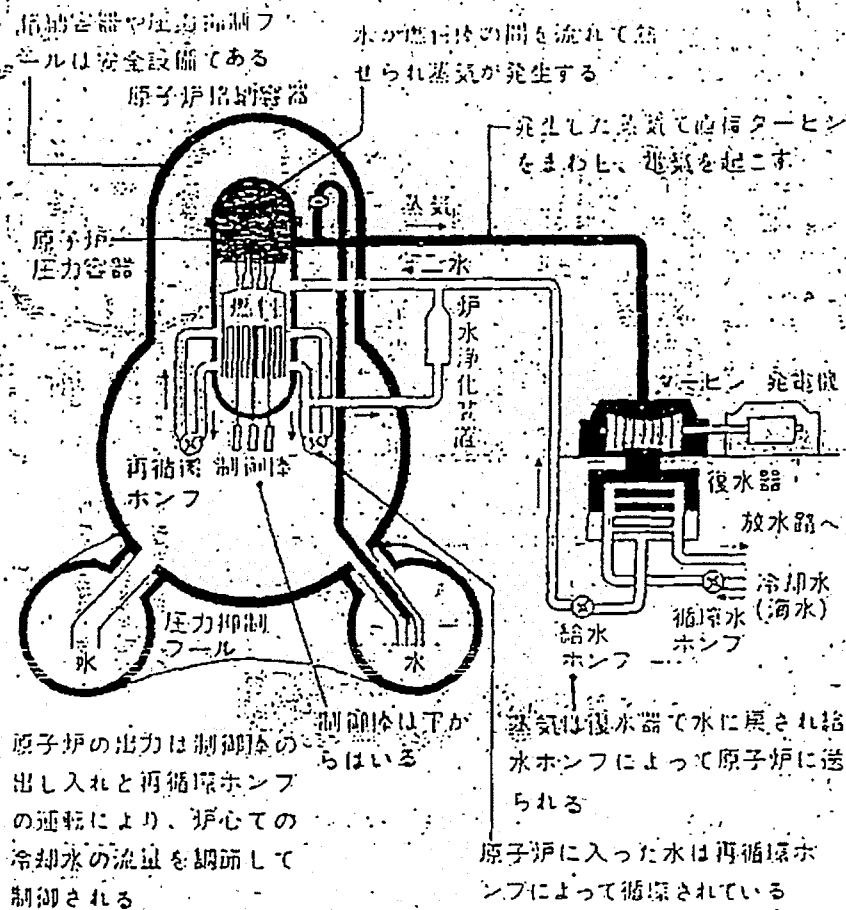
< 原子力発電所内の諸設備 >

原子炉建屋（建物）、補助建屋、タービン建屋及びその内部の主な設備の配置の一例



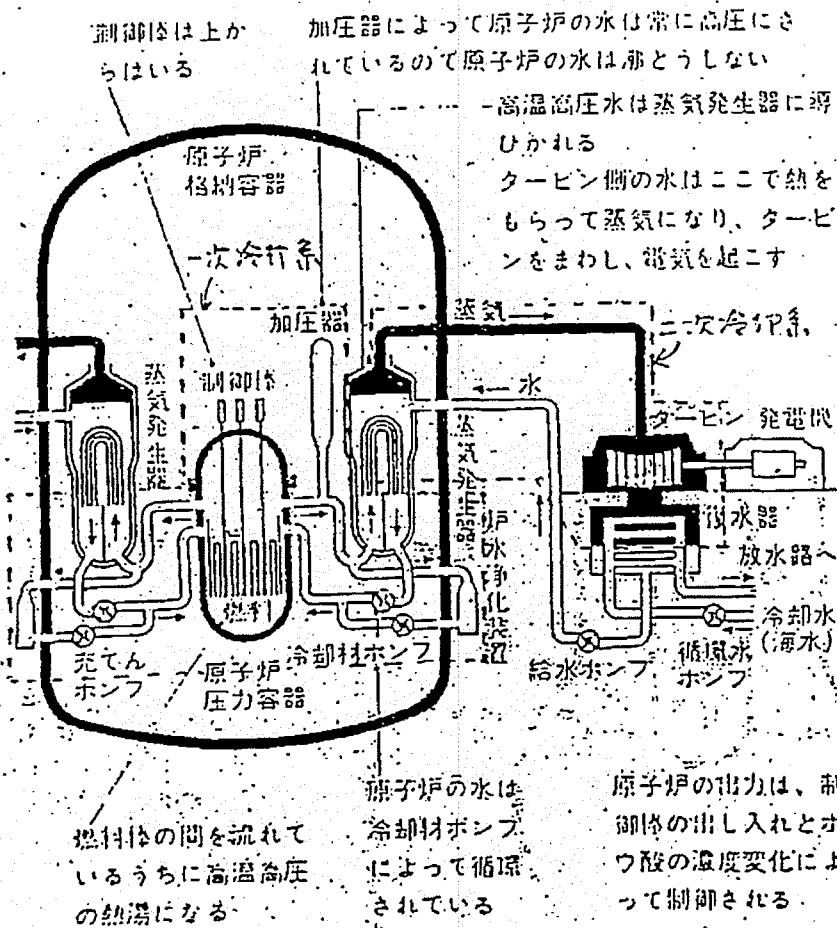
< 軽水炉のしくみ >

■沸とう水型原子炉(BWR)のしくみ



講談社『日本の原子力』より

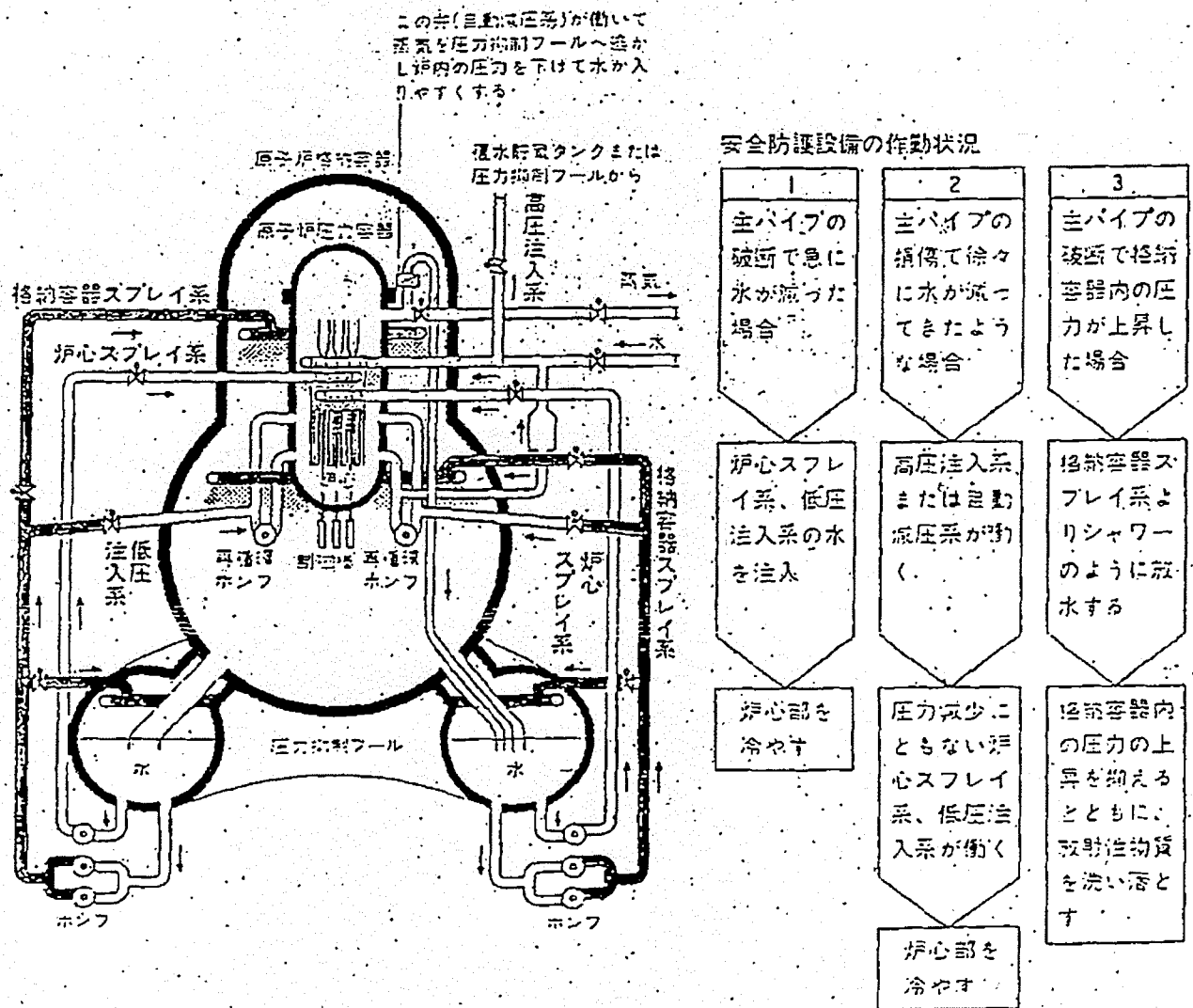
■加圧水型原子炉(PWR)のしくみ



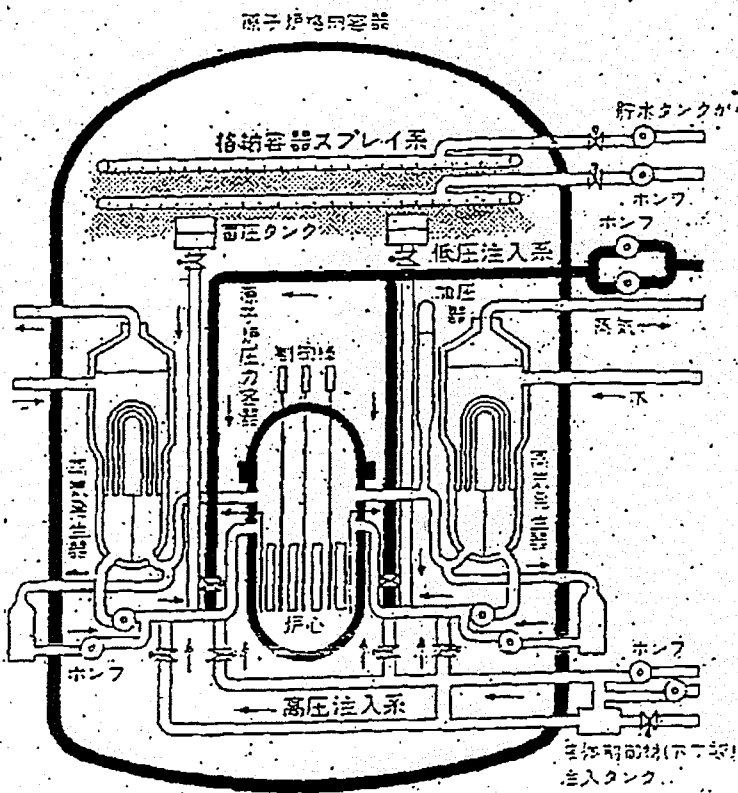
『日本の原子力』より

＜非常用炉心冷却系（ECCS）のしくみ＞

■ 沸とう水型原子炉（BWR）の非常用炉心冷却装置（ECCS）の例



■ 加圧水型原子炉(PWR)の非常用炉心冷却装置(ECCS)の例



安全防護設備の作動状況

1	2	3
主パイプの 破断で急に 水が減った 場合	主パイプの 損傷で徐々 に水が減っ てきたよう な場合	主パイプの 破断で、格 納容器内の 圧力が上昇 した場合
蓄圧系の水 を注入	高圧注入系 より水を注 入	格納容器ス プレイ系よ りシャワー のように放 水する
高圧注入系、 低圧注入系 が働く	圧力減少に ともない蓄 圧系、低圧 注入系が働 く	格納容器内 の圧力の上 昇を抑える とともに、 放射性物質 を洗い落と す
炉心部を 冷やす	炉心部を 冷やす	

『日本の原子力』より

<世界の原子力発電状況>

1983年6月30日現在

(単位：万KW、グロス電気出力)

順位	国名	運転中		建設中		計画中		計画中		計画中	
		出力	基数	出力	基数	出力	基数	出力	基数	出力	基数
1	アメリカ	6631	80	69329	61	496.6	4			14061.7	145
2	フランス	2687.8	34	3262.7	27			1778.6	13	7729.1	74
3	ソビエト連邦	1825.5	34	3144	31			3900	36	8869.5	101
4	日本	1734.2	25	1070.4	11			2513	10	2657.9	46
5	西ドイツ	1030.5	12	1265.1	11	260.4	2	1215.3	9	2771.3	34
6	イギリス	944.8	33	596.4	9			249.6	2	1790.8	44
7	スウェーデン	770.7	10	220	2					990.7	12
8	カナダ	769.7	13	837.6	11					1607.3	24
9	ベルギー	358.5	5	209.4	2					567.9	7
10	(古 月)	324.2	4	190.2	2			187.2	2	701.6	8
11	フィンランド	231.2	4					239.2	2	470.4	6
12	スペイン	205	4	970.7	10	100	1	410	4	1685.7	19
13	スイス	203.4	4	100	1	96.2	1	121	1	520.6	7
14	韓国	191.5	3	570	6					761.5	9
15	東ドイツ	184	5	26.4	6			176	4	624	15
16	ブルガリア	176	4	100	1			700	7	976	12
17	イタリア	132.5	3	207	3			600	6	832.5	12
18	アルゼンチン	98.4	2	74.5	1			187.2	3	360.3	6
19	チェコスロバキア	88	2	26.4	6	220	5	197.4	2	769.4	15
20	インド	86	4	141	6			47	2	274	12
21	ユーゴスラビア	66.4	1					104	1	170.4	2
22	オランダ	53.5	2							53.5	2
23	ハンガリー	41	1	132	3					176	4
24	パキスタン	137.6	1					96	1	1037.6	2
25	ブラジル			330.7	3			811.2	6	1141.9	9
26	南アフリカ			193	2					193	2
27	オーストラリア			135	2					135	2
28	キューバ			86	2			88	2	176	4
29	フィリピン			68	1					68	1
30	ルーマニア			62.4	1	62.4	1	124.8	2	249.6	4
31	ポーランド					88	2	88	2	176	4
32	エジプト							873.6	8	872.6	8
33	中国							235	5	235	5
34	イスラエル							187.2	2	187.2	2
35	アフガニスタン							130	1	130	1
36	インドネシア							104	1	104	1
37	タイ							93.6	1	93.6	1
38	フィリピン							65	1	65	1
39	イラン							62.4	1	62.4	1
計		18850.56	290	21130	221	1321.6	16	11918.6	137	55522.96	667

(用語解説)

(単位) (人) A J K Y

放射能・放射線 放射線の量または放射線を受ける物質中の原子の数の減少を示す。

キュリー (Ci) (単位) (人) A J K Y

放射性物質の量を表す単位。簡単にいえば、放射線の単位。放射性

の原子(詳しくは原子核)は自然に崩壊(壊変、disintegration)するが、1

秒間に370億個の崩壊がある場合を1キュリーとする。略(カ)で表す。

ベクレル (Bq) (単位) (人) A J K Y

キュリーに代わる新しい国際単位、1秒間に1個崩壊する場合を1ベク

レルとする。したがって1キュリー = 3.7×10^{10} ベクレル。略(ク)で表す。

レントゲン (R) (単位) (人) A J K Y

人体組織が放射線を受けた場合の影響は、放射線の種類などによって

差異がある。そのことを考えに入れた放射線量の単位。X線及びガン

マ線の場合には、1レントゲン = 1ラドに等しい。略(レン)で表す。

シーベルト (Sv) (単位) (人) A J K Y

レントゲンに代わる新しい国際単位。1シーベルト = 100レントゲンに等

しい。略(シー)で表す。

物質が放射線を受けた際の線量の単位。物質1グラム当たり100レントゲンの放射線を受けた場合を1グレイとする。略(グレイ)で表す。

グレイ (Gy) (単位) (人) A J K Y

ラドに代わる新しい国際単位。1グレイ = 100ラド。略(グレイ)で表す。

レントゲン (R) (単位) (人) A J K Y

エックス線とガンマ線の場合に限って用いられる線量単位。標準的な

の空気中に87.7レントゲンの放射線を受けた場合を1レントゲンとす

る。1ラドにほぼ等しいと考えてよい。略(レン)で表す。

ミリ (m) (単位) (人) A J K Y

1000分の1の意。(なお、100万分の1をマイクロ、1兆分の1をピコという)。

マン・レム(人・レム)

ある集団の中の一人ひとりが受けた線量の総和。(同じ考え方で、マン・ラド、マン・グレイ、マン・シーベルトなどが使われる)。

また最近では、マン(man)の代わりにパーソン(person)が使われることもあり、パーソン・レムなどという。

アルファ(α)線

放射線の種類。放射性元素が α 崩壊をする際に放出される。その正体はヘリウム原子核である。

ベータ(β)線

放射線の種類。放射性元素が β 崩壊をする際に放出される。正体は電子(あるいは陽電子)である。

ガンマ(γ)線

放射線の種類。光やエックス線と同類の電磁波。放射性元素の α 崩壊や β 崩壊に伴って放出されるばかりでなく、原子核のいろいろな変化の際にも放出される。

●設備その他

1次冷却水

原子炉内の燃料(核燃料)を直接冷却して、その熱を外に運び出す役目をする水。

1次冷却系

1次冷却水が循環する全系統。

冷却材喪失事故

1次冷却系が損傷して、1次冷却水が洩れ出る事故。

LOCA(ロカ)

冷却材喪失事故をいう。

非常用炉心冷却系

冷却材喪失事故の際に、燃料が水中から露出し、過熱によつて破損す

ることを防ぐため、炉内に水を注入するための設備。

ECCS

非常用炉心冷却系をいう。

希ガス

ヘリウム、ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノン(ゼノン)、ラドンの6元素の総称。化学的に極めて安定で、ふつう他の物質と反応せず、常温では気体。