

原発を考える

日本科学者会議京都支部

深尾 正之

報告者紹介

深尾 正之 1936年生

1955~61 京大学部電子工学科(制御) (修士課程まで)

‘61~’66 京大原子核工学教室助手として原子炉物理の研究

‘66~’67 名大理(流動研究員)で宇宙線観測

‘67~’89 京大原子核工学教室でプラズマ核融合の研究

(‘77~’82 米UCLAで訪問研究員)

’89 ~ ‘00(定年) 静岡大に移籍、プラズマに関する研究

原子力発電と火力発電

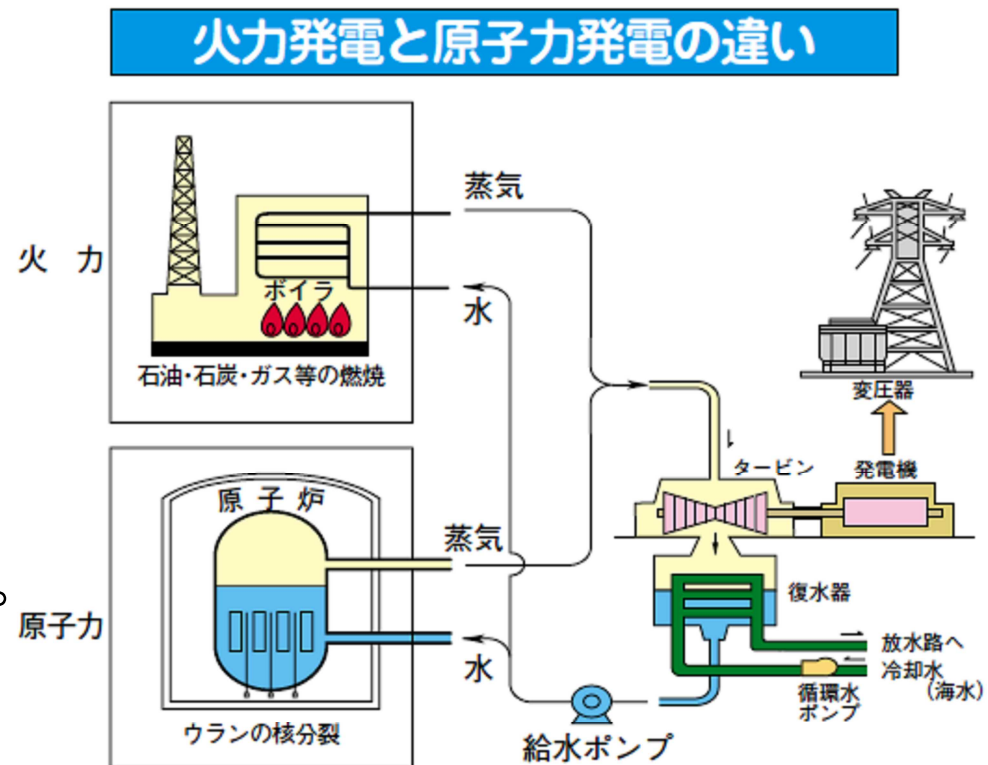
この図は、火力のボイラーが原子炉に置き換えられたものとして、**原子力発電の安全性**の宣伝によく使われている。

大きな違いが3つある。

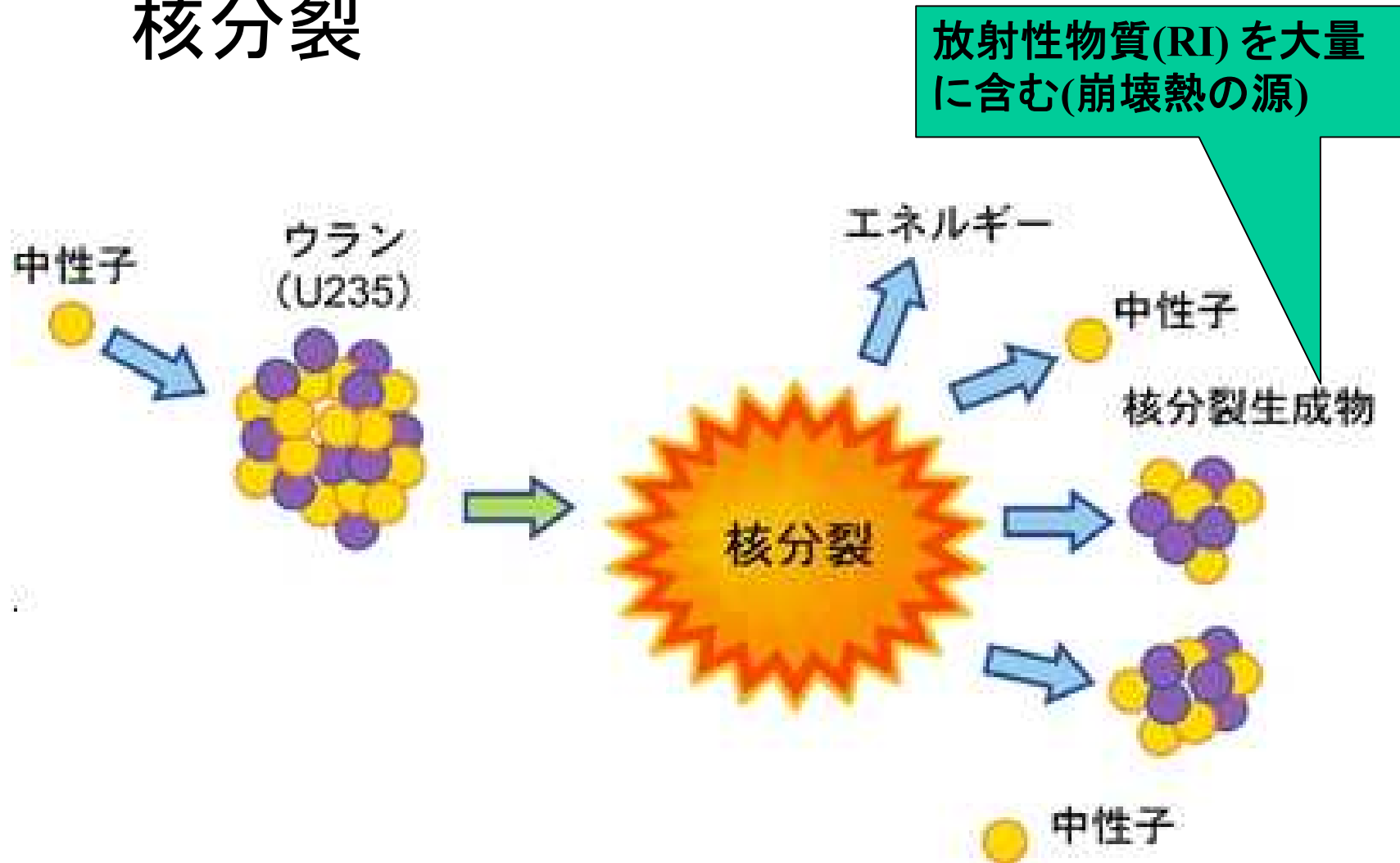
①火力発電では、燃料供給を止めれば安全に停止。原子力発電では、核分裂連鎖反応を止めても、炉内に存在する大量の**放射性物質**(核分裂破片=死の灰)からの**熱(崩壊熱)**の放出は、**止まらない**。冷却する以外に方法がない。

②火力では燃料は外部から供給。原子炉では、**数年分の燃料が、炉内に**装荷されている。

③**放射性廃棄物**の処理法がない。



核分裂



炉停止後崩壊熱 (2～5号炉)

時間	割合 ¹⁾ %	熱出力 MW	蒸発量 ²⁾ m ³ /h	温度 ³⁾ T(°C)
運転中	100	2381.00	—	—
停止時	7	166.67	265.81	—
1min	4.25	101.19	161.38	3079
10min	2.5	59.53	94.93	2662
1h	1.7	40.48	64.55	2392
3h	1.25	29.76	47.47	2195
1d	0.7	16.67	26.58	1862
3d	0.52	12.38	19.75	1709
10d	0.3	7.14	11.39	1455
30d	0.18	4.29	6.83	1247
100d	0.1	2.38	3.80	1040
1y	0.05	1.19	1.90	831

1) NUREG/CR-6042Rev.2 によって計算

2) 100°Cにおける気化熱540cal/gで計算

3) 燃料体4mφ × 3.5mの円柱表面から一様に輻射とした時の表面温度 × 1.5

東京電力福島原発で何が起こったのか

福島第1原発には1-6号機が稼動。

地震発生時、1-3号機は**運転中**、4-6号機は**定期点検中**であった。1-3号機は、若干の時間のずれはあるが、おおよそ同じ経過をたどる。4号機は、炉内に燃料体はなかったが、貯蔵プール中の使用済み燃料が事故を起こした。

小さな差異は無視して大きな経過を説明する。

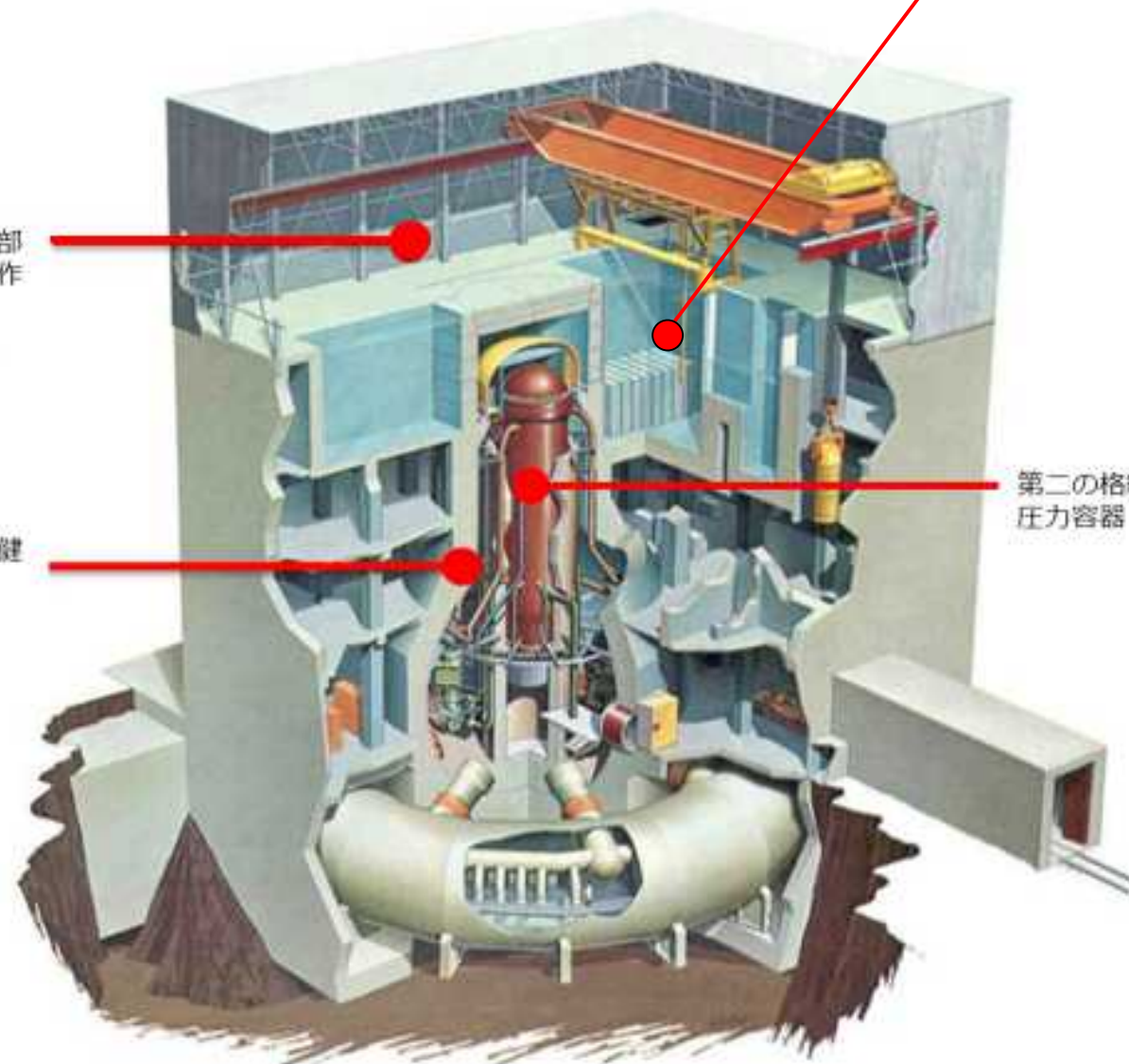
BWR

水素爆発によって吹っ飛んだ上部構造体。燃料交換等に利用する作業場。

メインとなる第三の格納容器。健全性は確保されている。

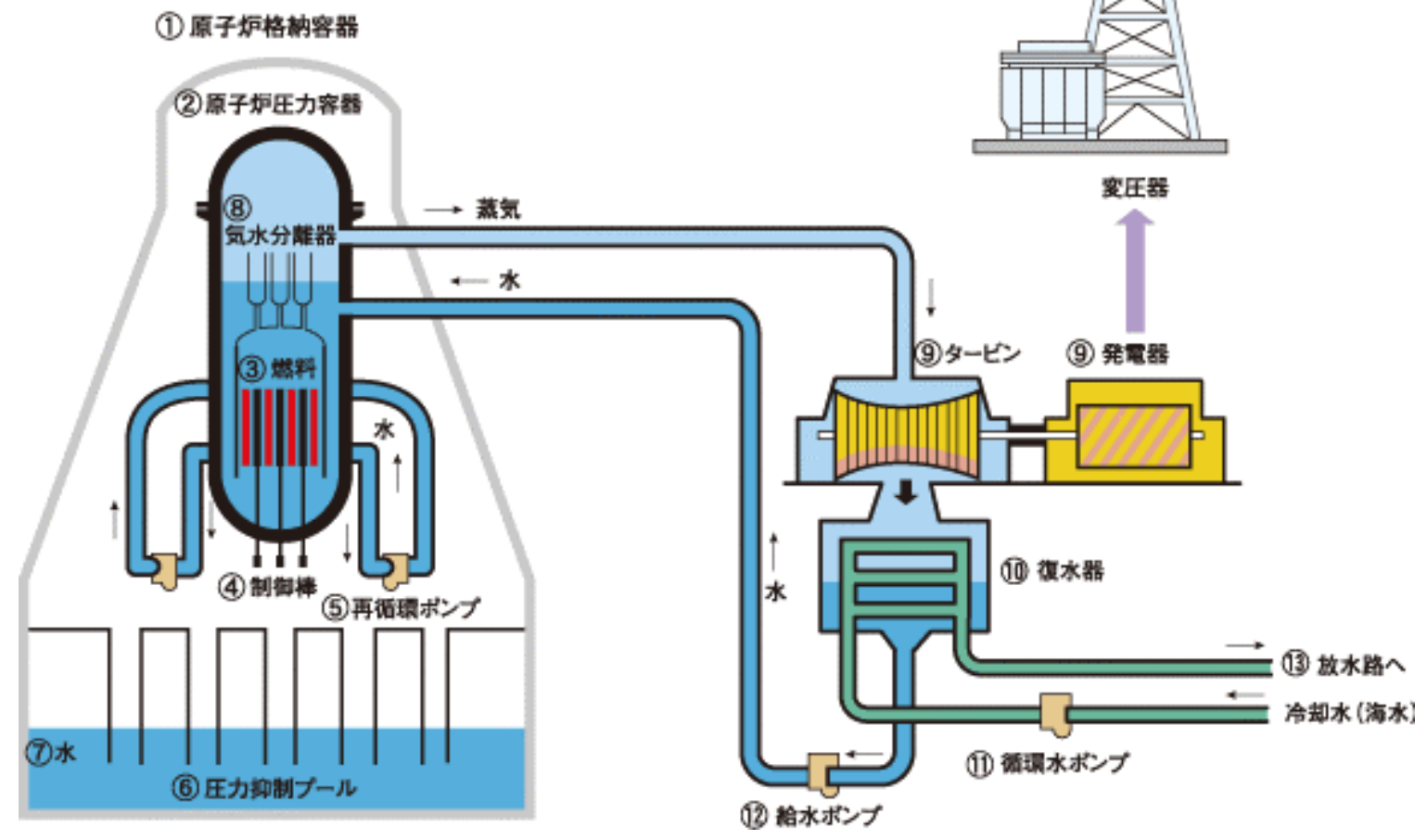
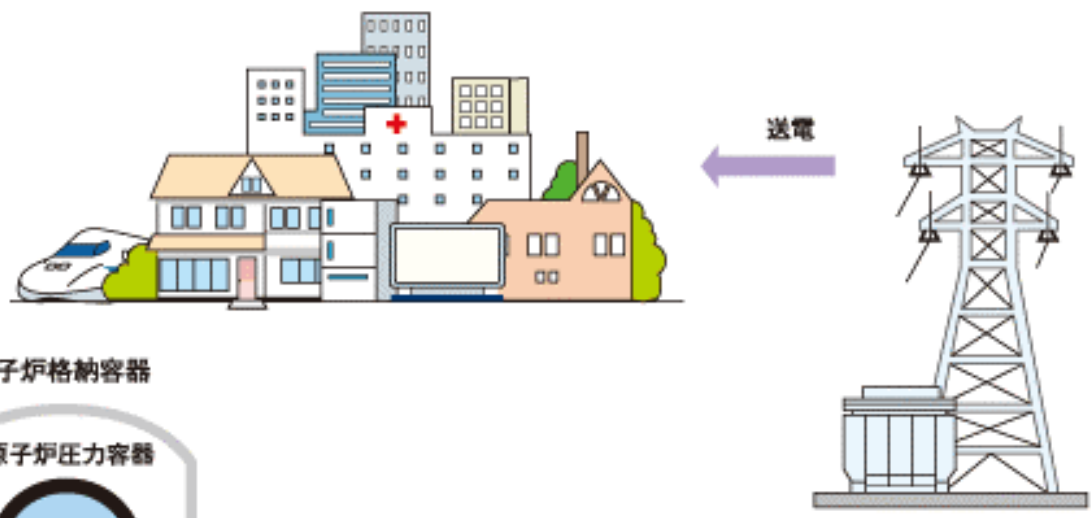
使用済み燃料貯蔵プール

第二の格納容器といえる
圧力容器



沸騰水型原子炉（BWR）透視図

BWR



経過①

地震で、安全装置が作動し、制御棒が挿入され、原子炉は**自動停止**。連鎖核分裂反応は**とまる**。

放射線として放出される熱(**崩壊熱**)を冷却する必要があるがポンプの駆動用外部電力が、地震のために使用不能。

緊急用ディーゼル発電機が自動起動し、電力を供給。冷却を維持。

約1時間後、**津波**が襲い、**ディーゼル発電機も停止**。

原子炉を制御するための電力がない「**電力喪失**」状態となる。

経過②

冷却水の循環が止まれば、水は**温度上昇、蒸発、水位低下**。

圧力容器内の**圧力**が上昇、**圧力容器保護**のため容器内の水蒸気を格納容器に逃がす。

水位が低下すれば、燃料体上部が冷却水面上に**露出**する恐れが出る。

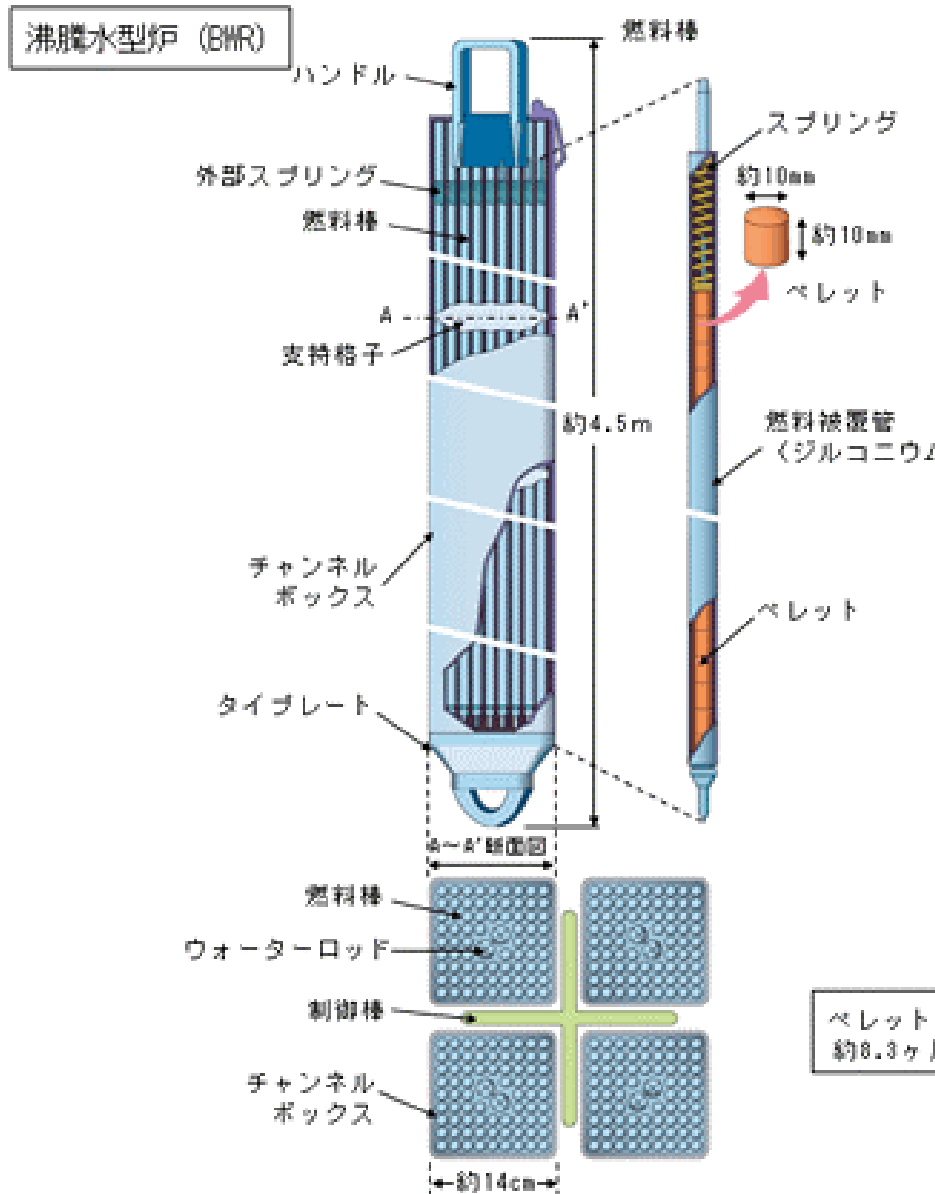
経過③

各炉室には炉心のほかに、使用済み燃料貯蔵プールがある。

その中の燃料体も崩壊熱で出す。冷却水は循環がなければ炉心と同様に、温度上昇、蒸発、水位低下、燃料体が水面上に露出する恐れが出る。

4号炉の炉心には燃料はなかったが、プールの燃料体が、爆発・火災の原因と思われる。

燃料集合体の構造と制御棒



燃料体は直径10mm×長さ10mmのペレットを厚さ1mm以下のジルコニウム(Zr)管(長さ4.5m)に詰める。(燃料棒)

これを8×8、または9×9正方形に並べて纏めたものが燃料集合体。4つをまとめてその間に制御棒。137組が装荷されている。

Zrは1850°Cでとける。
燃料体は酸化物で(UO₂)で2800°C

ペレット1個で1家庭の約8.3ヶ月分の電力量

燃料体

燃料体はペレット状酸化ウラン(UO_2)を厚さ1mm以下のジルコニウム被覆管で覆われている。

水面から露出すると、熱伝導が悪いので、温度は急上昇する。

1000°C近い金属に水蒸気(H_2O)が触れると、酸素Oが奪われ、水素が発生する。

更に温度が上がると被覆管が溶け、死の灰を大量に含む燃料体がむき出しとなる。

更に燃料が溶け落ち(メルトダウン)底に溜まれば、制御なしの核分裂連鎖反応が起る最悪事態となる。

ジルコニウムZr、の融点は1850°C、酸化ウラン(UO_2)の融点は2800°C

経過④

露出した燃料棒と水蒸気の反応で生じた水素(H₂)は水蒸気とともに格納容器に入り、格納容器の保護のために、弁を開いた(ベント)。水素は建屋に広がり、爆発(水素爆発)して、壁を壊し、更に原子炉容器や燃料体を機械的に壊した可能性もある。

3/11;地震

3/12;1号機 ベント→(5時間20分)⇒水素爆発

3/14;3号機 ベント→(5時間40分)⇒水素爆発

3/15;2号機、ベント→(6時間)⇒水素爆発、4号機が火災

1-,3-,4-号機は建屋が破壊され、2号機は建屋は形を留めているが、格納容器が破壊され、高濃度汚染物質を排出しているようである。

〈3月15日(火)〉の福島第一原発



(手前から)1号機、2号機、3号機。白煙の奥の白い壊れた壁が4号機＝15日午前7時33分、東京電力提供

経過⑤

今も**崩壊熱**発生は続き、4号機の炉心を除くすべての炉心とプール内の燃料体を**冷却**する必要がある。

現在**所定の電源**で**安定**な状態であるのは、5-6号機のみである。

1-3号機の炉心には、海水、後に真水が、消防ポンプあるいは電動ポンプで注入されている。水位は上昇しない。水は入っているのだろうか。1-4号機のプールにも定期的に水を補給している。

特に**2号機**は、**圧力/格納容器に破損**があり、高濃度汚染物質が流出している。2号機は破損により、冷却水を入れ易く、温度は早く下がった。汚染水流出を減らすために注水を制限している。1-4号機は**炉室の汚染が高く作業が困難**である。

炉心とプールの燃料体数と前回定期点検日

	定格出力 (万kW)	炉心 (本)	プール (本)	前回定期点検日
1号機	46.0	400	292	10/3/25-10/10
2号機	78.4	548	587	10/9/16-10/12/15
3号機	78.4	548	514	10/6/19-10/10/26
4号機	78.4	0	1331	10/11/30-
5号機	78.4	548	946	11/1/3-
6号機	110	764	876	10/8/14

稼動停止後の時間(11/5/20現在で)

1-3号炉心(70日)、 4号プール(170日+古い800本)
2号プール(250日)、3号プール(350日)

4号炉のプール内の燃料体

4号炉は昨年11月末に点検のために停止、170日を経た今も3.0m³/hの水が蒸発。

それ以前の燃料体が、炉心装荷量の1.5倍、仮に1年前に停止された燃料とすると、その冷却に4.5m³/hが必要で、合計は8m³/h以上となる。プールの底面積は10m×12m、15時間で1m水位が下がる。

地震から4号火災まで4日この間に水位は、6.4m以上の低下。燃料体が露出して火災・爆発に至った可能性は高い。

5月に入って東電は4号炉の爆発は3号炉からの水素によるとしているが、3号機は3/14に爆発して建屋は破壊、4号機は3/16に爆発、これをどう解釈する。

放射線被曝の難しさ

大量被曝で、**即死や重症**となる場合の因果律は明白。

しかし、後日ガンを発症する晩発性症状の、取り扱いは困難。放射線の人体への影響は**確率的**。被曝者の**人数**によって、被害の**有無**が決まる。

発症率が0.0025%(=年間交通事故死率)とする。100名の集団(ある会社など)の被曝では、**患者が出る確率は0.25%**で、まず、**影響がない**と判断する。東京(**1500万人**)を対象する広域被曝では、年間**375名の患者**がでる。これは**無視できない**。

ガンが発症した時、それが放射線による影響かどうかはわからない。10-20年後、**統計**を見れば、被曝事故があった時から患者数が**増える**。その結果、事故の責任を問える場合はあるが、そのとき、誰を救済すべきかはわからない。

許容被曝線量

ALARA (As low As Reasonably Achievable=**合理的に達成できる限りできるだけ低く**)という考えは世界的に合意されている。

とはいえ、具体的な許容基準を設定することは必要。**ICRP**(国際放射線防護委員会)によって勧告が出されている。(その内容に強い異論もある)

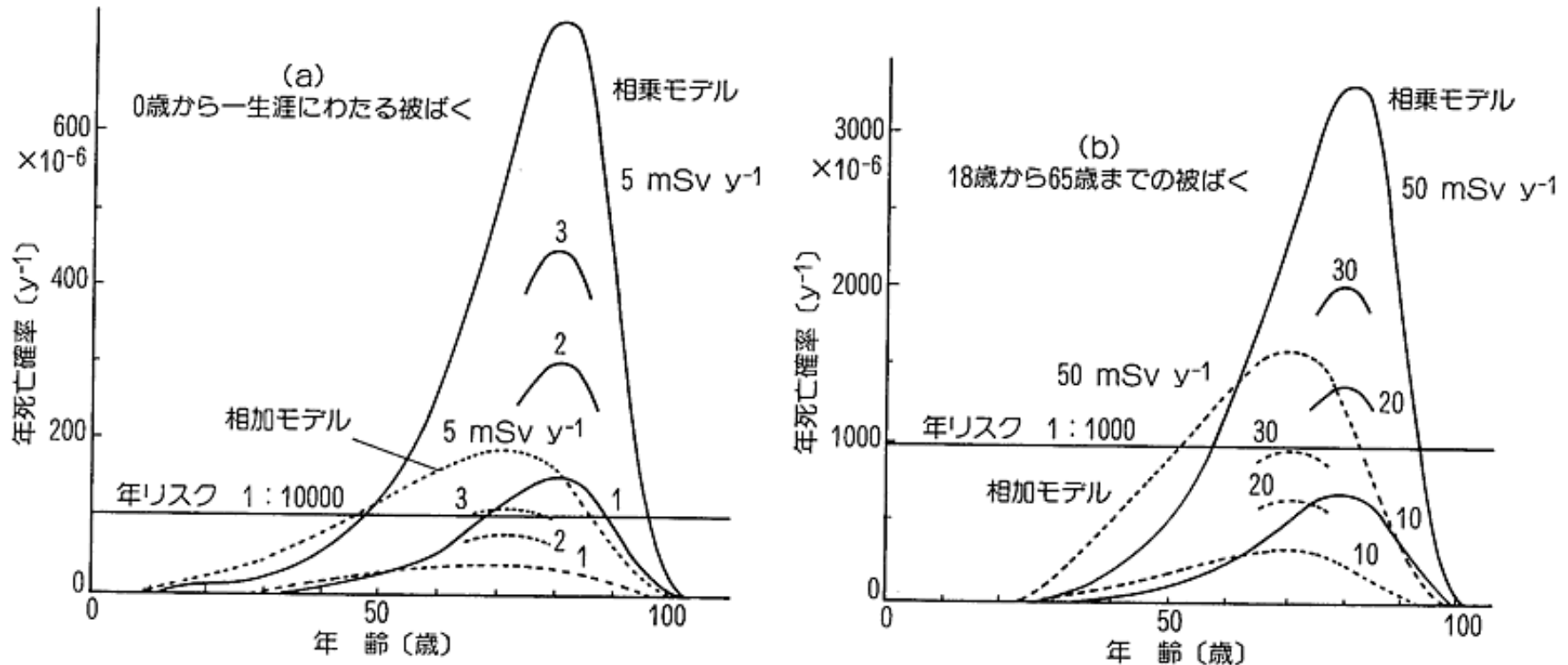
その内容は単純でないが大雑把に言って、

一般公衆の許容量 1mSv/年、
作業に従事する人は 50 mSv/年 とされている。

4号機の火災のとき、3号炉前で、4 mSv/時間の線量、そこに15分立っていたら、1年分の被曝をしたことになる。空中から水をまいた自衛隊員の被曝は0.5 mSvであった。

その後、放射性物質の放出が続き、環境線量は高くなった。

許容線量はいかにして決められたか



a)誕生から一生涯にわたる被曝 及び b)18歳から65歳までの被曝
 それぞれ女性について計算したもの。線量及び線量率効果係数(DDREF)は2と仮定。

図2 生涯死亡率 (無条件年死亡率)

〔出典〕 ICRP Publication 60 "Recommendation of International Commission on Radiological Protection", (邦訳:日本アイソトープ協会)、附属書C(図C-9)から引用
 DDREF = Dose and Dose-Rate Effectiveness Factor,

？直ちに影響が出ることはない？

政府、東電、学者から聞くこの発言は禁句である。
発症率が10%の事故でもこの表現で済まされる。

許容被爆線量は、何のために作られたのか？ その根拠を無にする発言である。

例えば「発症確率が0.05%から0.5%に増加する(程度)」と言うことにすればよい。

炉周辺作業の放射線量線量

ICRPの勧告では作業者の許容量は 50 mSv/y

この基準を、政府は 250 mSv/y に変更した。

元の基準では、作業が出来ないからであろう。

→こんなことが許されるのか？

5/20に、2号室に人が15分入ったが、作業内容は、線量測定と、高湿度の実感(?)。ロボットで十分こなせる内容である。

国際世論の動き

- ・東電の広報、日本政府の事態掌握は不十分と指摘。
- ・米NRCの助言で米領事館は半径80km以内の米国人に避難・米 국무省は東京・横浜までの米政府役人の家族に、自主避難を勧めている。
- ・日本の無策は、国際的な被害をもたらしている。内政干渉でも、強制的介入が必要との強硬論もある。
- ・新潟地震(2007年7月)のとき、世界最大の柏崎刈羽原発基地(100万超kW級7基)がどうなったかに、海外のメディアは、いち早く反応した。安全神話に犯された日本のメディアは、びっくりしていた。そのときは、日本の原発技術の株が上がったかもしれない。しかし今回の災害で、「やはり」と思ったのではなからうか。

この事故の特徴と処理の問題点(1)

- ① 原発事故で**電源喪失**は初めての経験である。対処マニュアルはない。事実、ECCSが作動して、炉心は冷却された。温度が下がりすぎると手動でECCSを切った。これの被害は計り知れない。現場の係員はマニュアルに従った。幹部技術屋は、当然冷却を続ける指示をするべきであった。その無作為は社風であろうか？「想定を超えた地震・津波」は言い訳にならない。
- ② マニュアルにない事態に対処するのが**危機管理**技術である。全体を見通し、事項の掌握と優先順位付け、点検と指示などの訓練がなされていない。安全神話ボケ？
- ③ 炉の現状は不明との報道ばかりであった。冷却水循環とは異なり、各種計測機器は小電力で作動する。現状認識の方法は多くある中で、どれだけの積極的な努力がなされたのであろうか。

この事故の特徴と処理の問題点(2)

- ④ 福島第2原発は無事に危機を乗り切った。非常ディーゼルが機能したからである。東電は第2と同様にディーゼルを炉建屋と一体化すればよいと言っている。炉が事故を起こせばその非常電源は使えない。非常用機器は立地点の異なる**独立性高い建屋**で、形式も異なる機器を設置すべきであろう。
- ⑤ 1-,3-,2-,4-号機と同じ水素爆発をおこした。幹部技術者の初動体制は無策であった。
- ⑥ 貯蔵プールの冷却系対策は、容易だったはず。
- ⑦ 炉の**構造に精通**している人が、緊急対策室に適正に配置されていたら、何らかの対策はなされたはずである。該当する技術者は、電力会社ではなく、製造者側の人であろう。英知を集める工夫と努力を。今も炉心冷却法に工夫が求められている。

この事故の特徴と処理の問題点(3)

⑧ 米軍事ロボットが投入されたが、放射線計測器、カメラを備えた「防災モニタリングロボット」(原子力安全技術センター、2000年製)は、地震発生から数日後、東電側に引き渡されたが使われた形跡はない。更に東海村JCOの臨界事故(1999)のあと、30億円を投じて、災害用ロボットが6機建造されながら、電力会社は不要として受け入れを拒否し、廃棄されたという。この傲慢さ。

⑨ 炉心には今も、蒸発量以上に注水されているが、水位は上がっていない。その水は何処へ行っているのか？

⑩ 「収束に向かっているのか？」 東京電力の公報を見る限り依然として判らない。燃料の発熱量は、水蒸発量にして5m³/h程度まで、減衰しているので、余程の失敗をしない限り、事態の急な悪化はないだろう。燃料がどのような形で炉の下部にとどまっているのか？ 再臨界に対する警戒は本当に十分なのか？

最近の出来事

○ 1号炉の水位計を校正、水位は燃料下端よりさらに4m下にまでしかないと判った。これより逆算して3/12にすでに、炉心溶融が起り、圧力容器下部に溜まっていると、辻褄を合わせた。

3/22の時点で、1号炉の圧力容器が400°Cになっていた。計測の誤りでなければ、容器中に水がないことは自明であった。

私の希望

菅首相が発言していた、「送」「発」の分離は、ぜひ実行すべきである。今は絶好のチャンスである。

送配電会社(機構)の運営は、国民の監視の下におき、**発電は自由化、競争原理**で購入する。自然エネルギーの開発のための**高値購入**があっても良い。

発電ビジネスに興味を持つ企業は多い。熱を使う企業にとって、まず発電をし、その**廃熱を利用するCo-Gen**を活用すれば、総合効率は高まる。

発電を原発で儲ける会社はなくなるのではなかろうか。

周波数は当然60Hzに統一する

将来のエネルギーをどうする(1)

福島原発災害は、**自然災害が引き金**であった。TMI事故、チェルノブイリ事故は、自然災害とは**無縁**である。米中部では、竜巻で外部電源喪失は頻繁に起きている。今後何が起こるか予測が付かない。人類と核エネルギーは共存できないと思う。

EUの多くの国は、原発はやむを得ず利用するが、可能な限り早く自然エネルギーに還ることを公表している。

最終的には、現在の太陽エネルギーに依存した自然との共生を目指さなければならない。しかし現在利用できる風力・太陽電池・地熱・バイオ技術でもってしては、すでに利用されている原子力に取って代わることは出来ない。

将来のエネルギーをどうする(2)

自然エネルギーを強力に進めてきたドイツでも水力以外の自然エネルギーは発電の10%以下である。

日本では、水力が8%ほど利用されているが、他の自然エネルギーは1%以下である。OECD国で、日本だけが飛びぬけて自然エネルギーに無関心である。全面的に原発依存を決め込んでいたのである。

現時点では、危険を承知した上で、原子力を注意深く利用せざるを得ない。

安易に原子力に依存すれば、取り返しの付かない事態となる。**原子力は麻薬**と心得て、最低限にとどめるべきである。

将来のエネルギーをどうする(3)

2050年までに、火力も全廃をめざす必要がある。日本の水力は電力会社の見積もりでは、現在の1.5倍までである。効率15%ほどの太陽光発電に片寄らず、太陽熱の多様な活用を。まず風力と地熱を他の先進国並みまで増やすこと。

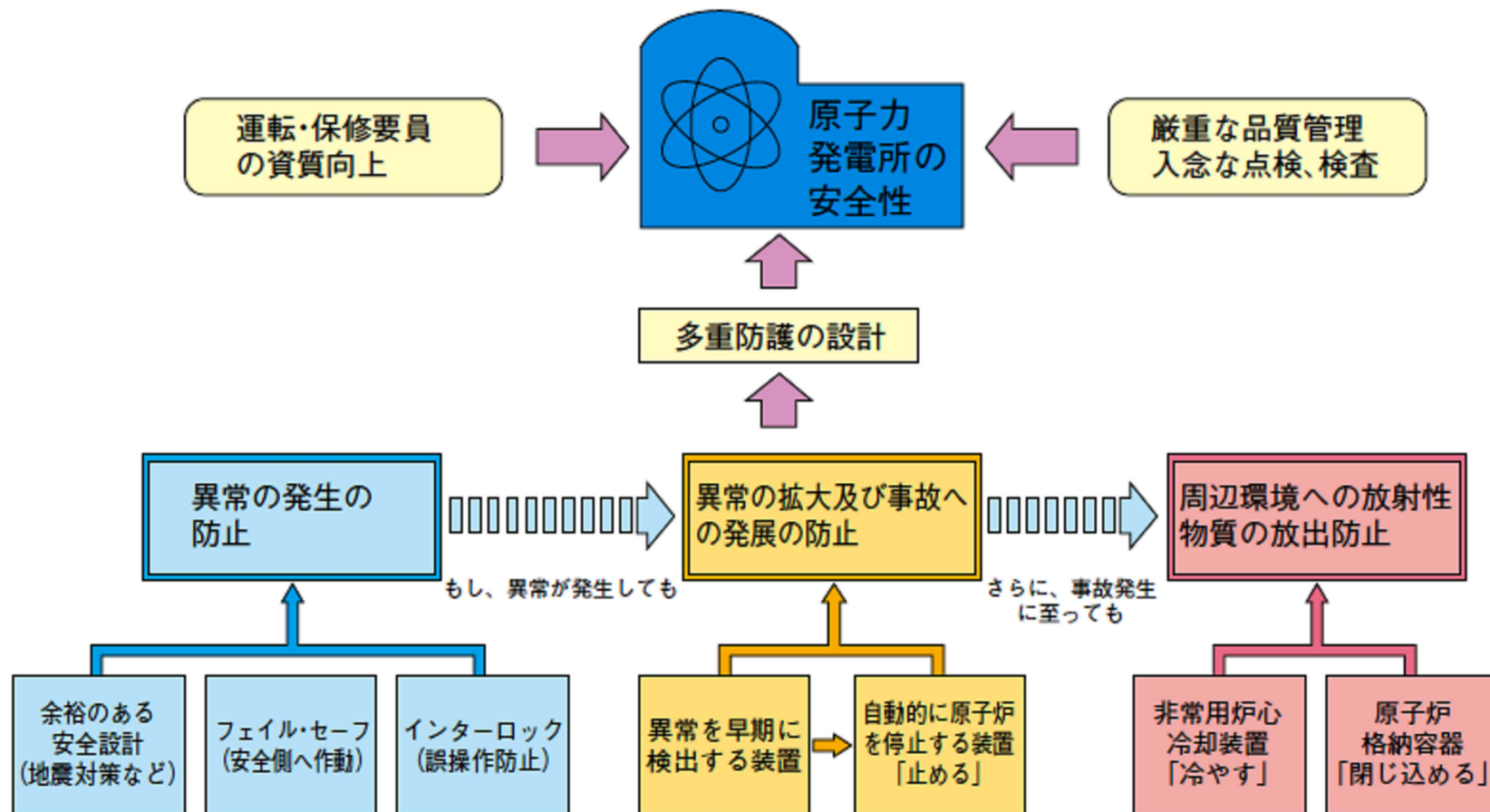
太陽光は晴天時 $1\text{kW}/\text{m}^2$ 、雨天・夜間を平均しても $0.1\text{kW}/\text{m}^2$ 降り注いでいる。一般家庭でのエネルギー消費量はガス・灯油を含めて $2\text{--}3\text{kW}$ 、熱利用効率50%とすれば、 60m^2 (20坪)の面積に降り注ぐ太陽光で賄える。

太陽熱利用、潮流発電、植物性プランクトンを使ったバイオエネルギーなど、斬新な技術開発を行えば、太陽光のみで、文化的な生活を営むことは十分に可能であると考えている。

ご清聴有難うございました。

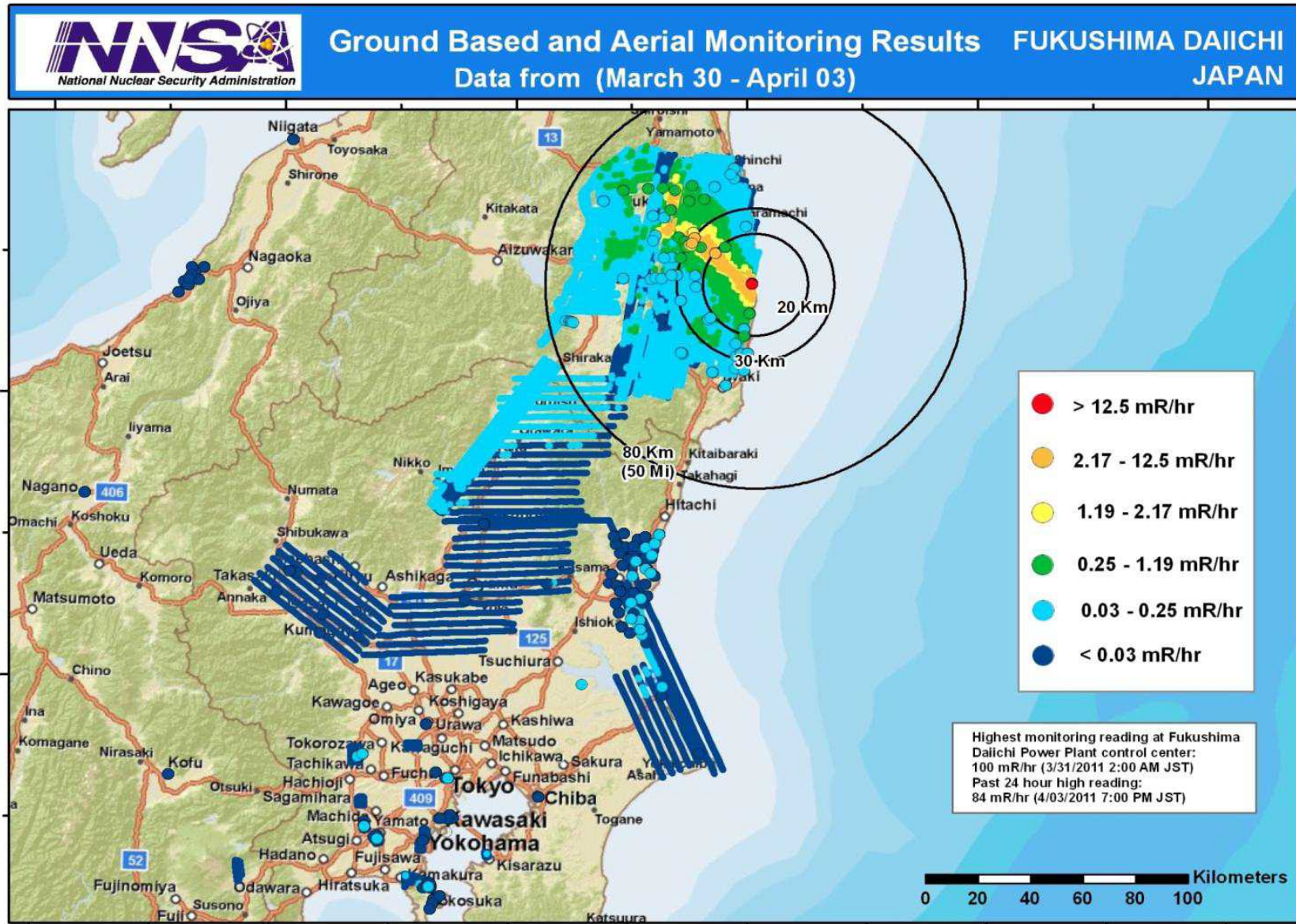
エネルギー資源庁資料より

安全確保のしくみ



米エネルギー省による調査(2)

1mSv = 100mR



Map created on 04032011 2340 JST
Name: NIT Combined Flights Ground Measurements 30Mar_03Apr2011 Results

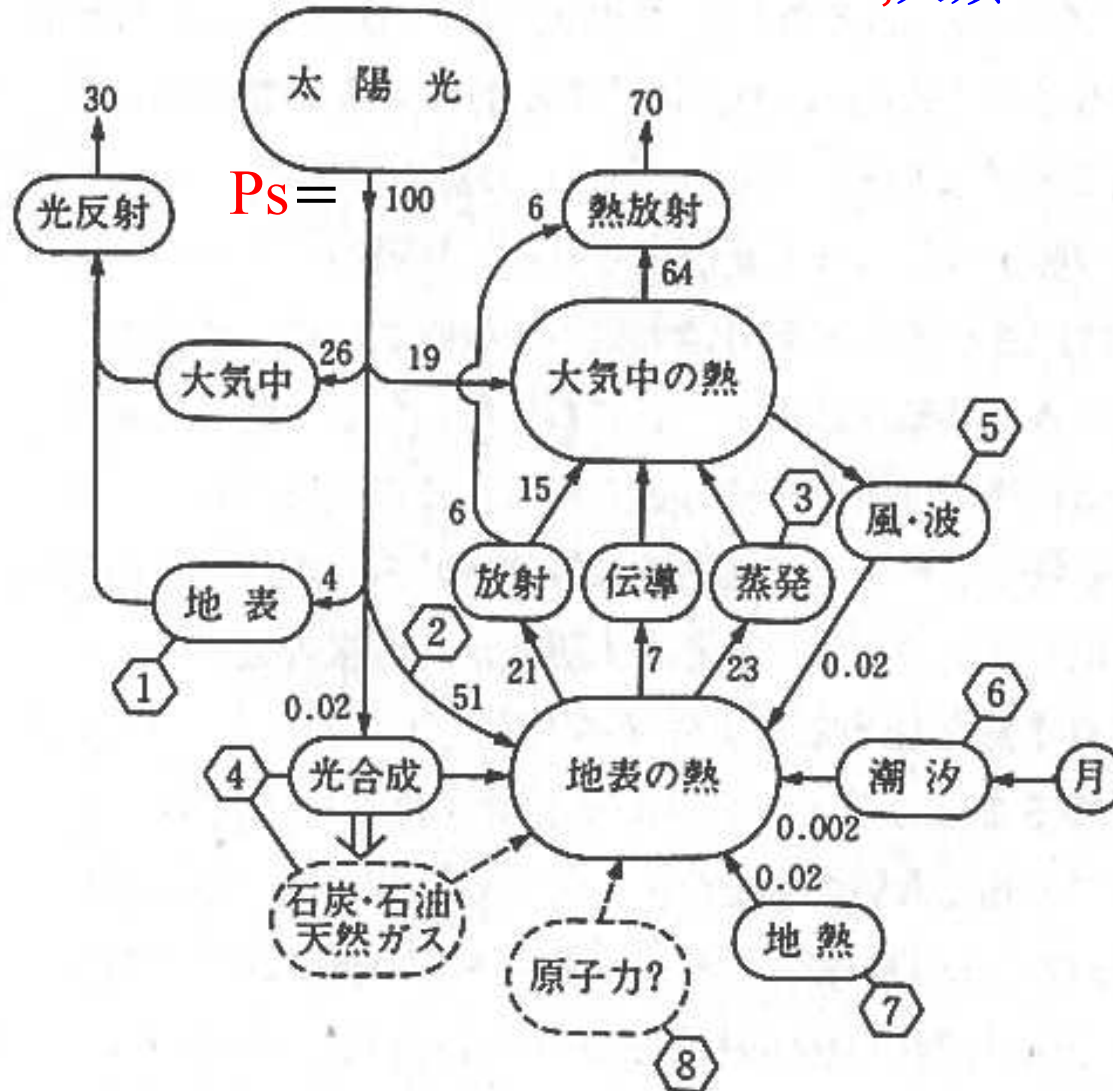
UNCLASSIFIED

Nuclear Incident Team DOE NIT
Contact (202) 586 - 8100

地球をめぐるエネルギーの流れ

総エネルギー流束
 $1.7 \times 10^{17} \text{ W}$

Ph; 人類のエネルギー消費; 0.009



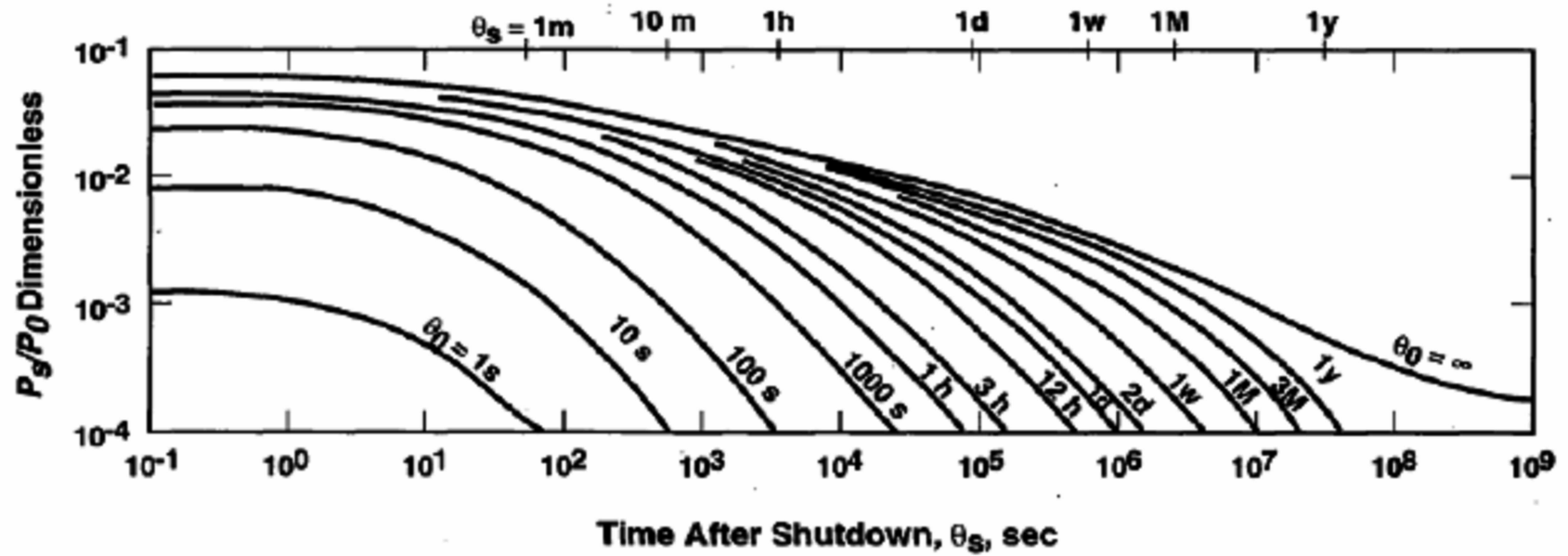
- (1) 太陽光発電
- (2) 太陽熱利用
- (3) 水力発電
- (4) バイオ
- (4)' 化石燃料
- (5) 風力・波力
- (6) 潮力
- (7) 地熱
- (8) 原子力

冷却系

- 1 運転時冷却系 発電中の循環系
- 2 隔離時冷却系 連鎖反応停止後崩壊熱を除去するための冷却系
- 3 緊急炉心冷却系 (ECCS Emergency Core Cooling System)
想定外の事故などで制御不能のときの冷却系
- 4 使用済み燃料貯蔵プール冷却系

所要電力は**発電出力の1%** (7800kW)と言われている。非発電時の必要量は？

DecayHeat



BWR hardware

表1 沸騰水型炉(BWR)プラントの基本仕様

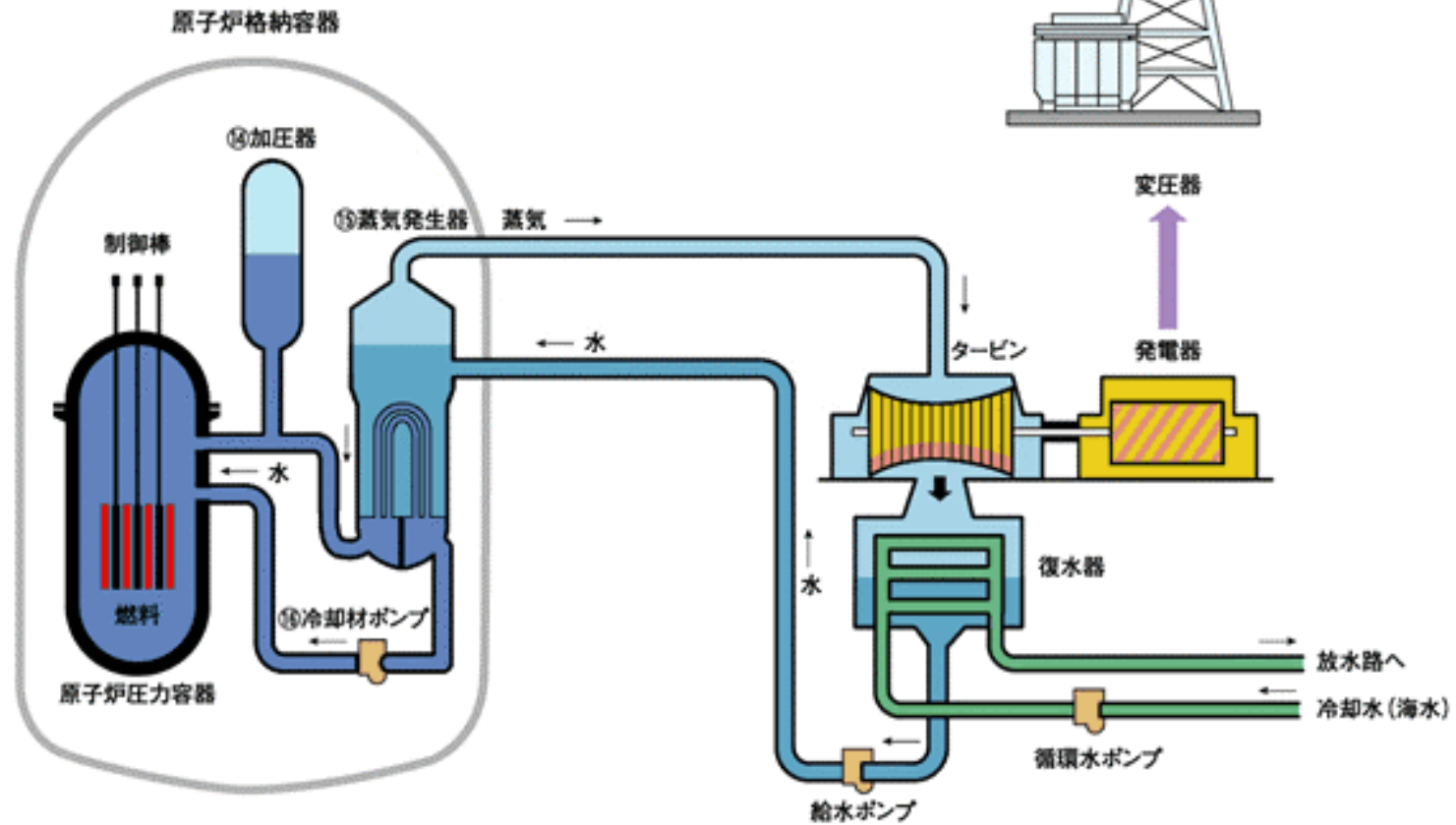
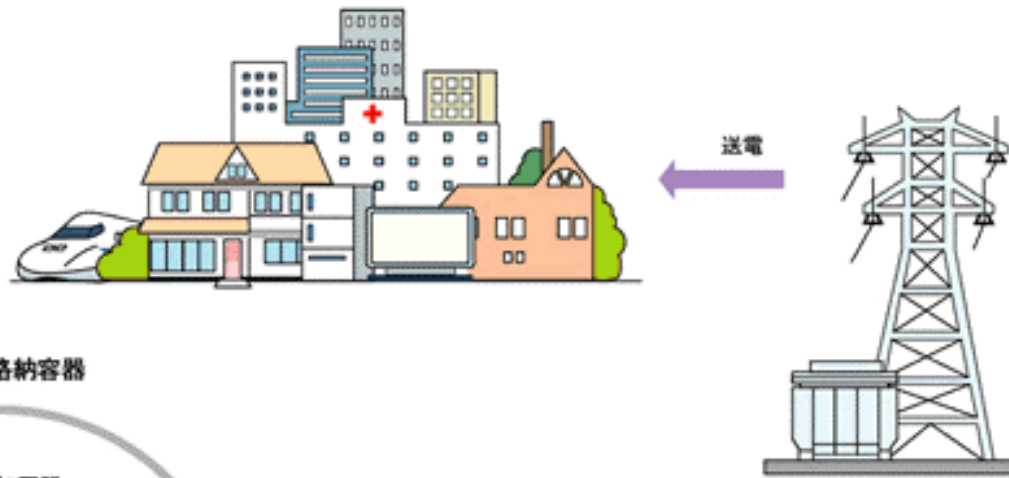
主要項目		500MW級	800MW級	1100MW級	1356MW級(ABWR)
原子炉熱出力		1356MW	2381MW	3293MW	3926MW
原子炉圧力		70.3 kg/cm ² g	70.7 kg/cm ² g	70.7 kg/cm ² g	72.1 kg/cm ² g
蒸気流量		2480t/h	4440t/h	6410t/h	7640t/h
給水温度		178°C	197°C	216°C	216°C
燃料集合体数		400	548	764	872
燃料棒配列		8×8, 9×9	8×8, 9×9	8×8, 9×9	8×8, 9×9
制御棒本数		97	137	185	205
炉心寸法		3.4mφ×3.7m	4.0mφ×3.7m	4.8mφ×3.7m	5.2mφ×3.7m
炉心出力密度		40.6kW/l	50.4kW/l	50.0kW/l	50.6kW/l
炉心冷却材流量		21800t/h	33300t/h	48300t/h	52200t/h
原子炉 圧力容器	内径 高さ	4.7m 21m	5.6m 22m	6.4m 23m	7.1m 21m
原子炉 再循環系	ポンプ台数	外部再循環ポンプ2台 ジェットポンプ20台	外部再循環ポンプ2台 ジェットポンプ20台	外部再循環ポンプ2台 ジェットポンプ20台	インターナル ポンプ10台
適用タービン 形式	50Hz用 60Hz用	TC4F-35 TC4F-38	TC6F-35 TC6F-38	TC6F-41 TC6F-43	TC6F-52 TC6F-52

(注) 500MW級は福島第一1号機, 800MW級は福島第一5号機を例としている。

下記の出典をもとに作成した。

[出典]火力原子力発電技術協会(編):原子力発電所一全体計画と設備一(改訂版)(平成14年6月)、p.14

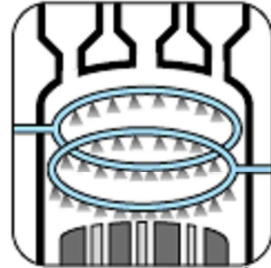
PWR



BWR緊急冷却系

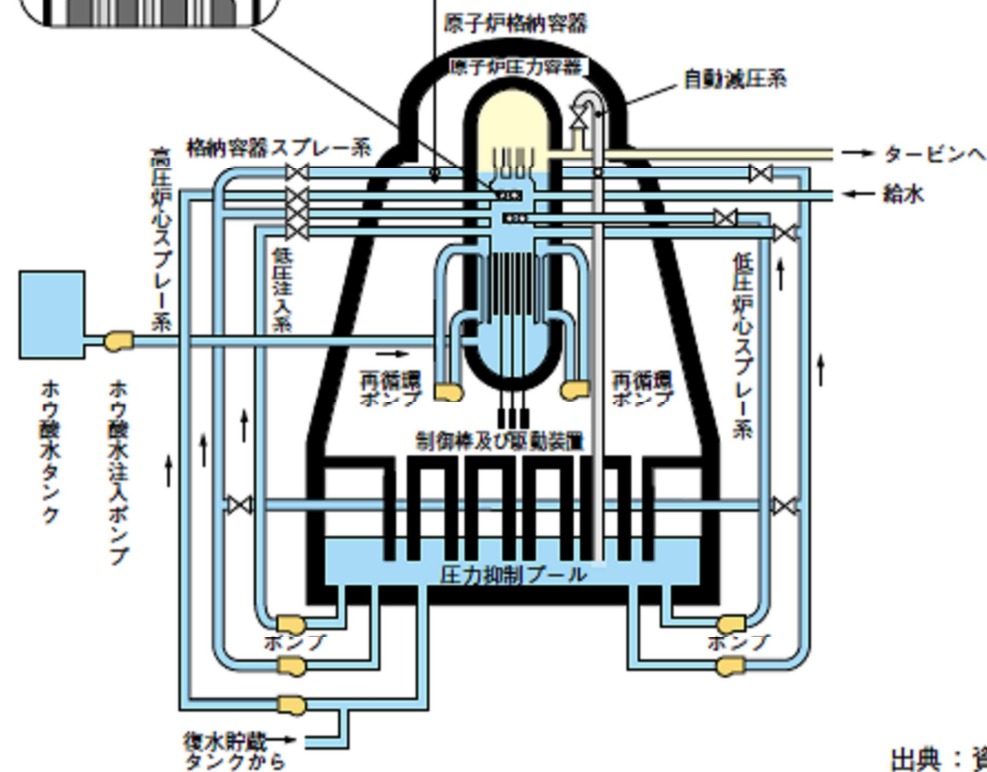
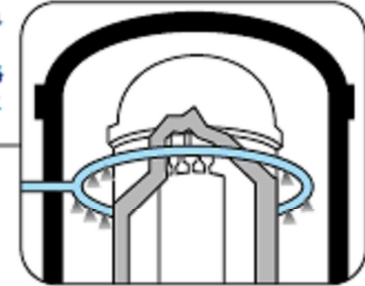
非常用炉心冷却装置

ドーナツ型の穴のあいた水管があって炉心の水が減ると、自動的にスプレーのように放水され燃料を冷やします。これが炉心スプレー系の冷却装置です。



格納容器スプレー装置

格納容器の内壁に取り付けられたドーナツ型の水管からも、水がシャワーのように流れて格納容器の内部を冷やします。これが格納容器スプレーです。



出典：資源エネルギー庁「原子力2008」

1号機周辺の環境放射能 (Asahi.com 3/21、11時)

東電が、3/19 1号機の北西約200メートルの空気中から採取
空気1ccあたり

^{131}I (8.02d); 5.9 mBq

^{132}I (2.30h); 2.2 mBq

^{133}I (20.8h); 0.04 mBq

^{134}Cs (2.06d); 0.02 mBeq

^{137}Cs (30.07y); 0.02 mBq

線量と発症(澤田による)

脱毛の発症の被曝線量 $N(2.75 \text{ Sv}, 0.79 \text{ Sv})$

下痢の発症率は、初期放射線による下痢発症率は脱毛に比べて高線量の被曝領域で大きくなる半発症線量の大きい正規分布 $N(3.03 \text{ Sv}, 0.87 \text{ Sv})$

放射性降下物による被曝の下痢の発症の場合は脱毛に比べて小さい被曝線量から発症率が大きくなる半発症線量の小さい正規分布 $N(1.98 \text{ Sv}, 0.57 \text{ Sv})$

放射性 核分裂破片 生成率

(引用 MIT-NSE)

生成割合	生成物	記号	半減期
6.8%	セシウム-133/134 ¹⁾	¹³³ Cs / ¹³⁴ Cs ¹⁾	2y
6.3%	ヨード-135/セノン-135	¹³⁵ I / ¹³⁵ Xa	7h
6.3%	ジルコニウム-93	⁹³ Zr	1.5 × 10 ⁸ y
6.1%	セシウム-137	¹³⁷ Cs	30y
6.1%	モリブデン/テクネチウム -99 ²⁾	⁹⁹ Mo/ ⁹⁹ Tc ²⁾	2 × 10 ⁵ y
5.8%	ストロンチウム-90	⁹⁰ Sr	30y
2.8%	ヨード-131	¹³¹ I	8d
2.3%	プロメチウム-147	¹⁴⁷ Pm	3y
1.1%	サマリウム-149	¹⁴⁹ Sm	非放射性
0.7%	ヨード-129	¹²⁹ I	1.5 × 10 ⁷ y
0.4%	サマリウム-151	¹⁵¹ Sm	90y
0.4%	ルテニウム-106	¹⁰⁵ Ru	1y
0.3%	クリプトン-85	⁸⁵ Kr	11y
0.2%	パラジウム-107	¹⁰⁷ Pd	7 × 10 ⁶ y

単位 y;年、d;日、h;時間

1) ¹³³Cs は非放射性であるが、生成率が高く、炉内で中性子を吸収して放射性 ¹³⁴Cs となる。

2) 2 × 10⁵ y は ⁹⁹Tc の半減期、⁹⁹Mo は 66 h で ⁹⁹Tc^m、更に 6 h で ⁹⁹Tc になる。