

原子炉と原子力発電所

写真 [1 福島第一原発全景\(被災前\)](#)
写真 [2 福島第一原発全景\(被災後\)](#)
表 [3 福島第一原発の設備概要](#)

1. 原子力発電所のしくみ

[A 原子力発電所（BWR）のしくみ](#)
[B 原子力発電所（PWR）のしくみ](#)

2. 核分裂と崩壊熱のしくみ

1) 核分裂で放出されるエネルギー

[C 核分裂のしくみ](#)

- 2) 崩壊熱のしくみ
- 3) 燃料の燃焼の結果

[D 元素の周期律表](#)

[E 核分裂生成物の生成割合](#)

[F 核分裂と崩壊熱のしくみ](#)

[F C 燃料の燃焼の結果](#)

3. 原子炉周りの構造

- 1) 原子炉建屋の構造
- 2) 原子炉压力容器と原子炉格納容器
- 3) 燃料集合体と制御棒

[K 原子炉建屋](#)

[L 原子炉格納容器と压力容器](#)

[M 燃料集合体と制御棒](#)

4. 原子力発電所の安全設計

- 1) 安全設計指針
- 2) 核分裂生成物を閉じ込める5重の障壁
- 3) 非常時炉心冷却設備
- 3) 電源系の多重性

[G 原子力発電所の安全設計指針](#)

[H 核分裂生成物を閉じ込める5重の障壁](#)

[N 非常用炉心冷却系](#)

[K 多重の電源系](#)

5. 重大事故を起こした原発

- 1) チェルノブイリ原発事故
- 2) スリーマイル島原発事故

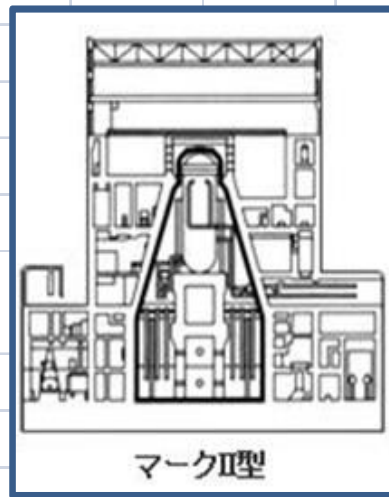
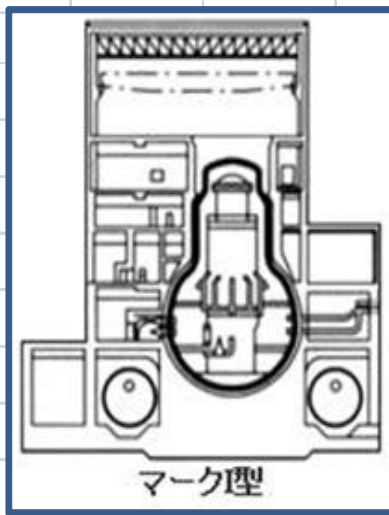
[P チェルノブイリ原発事故](#)

[Q スリーマイル島原発事故](#)



福島第一原子力発電所 設備の概要

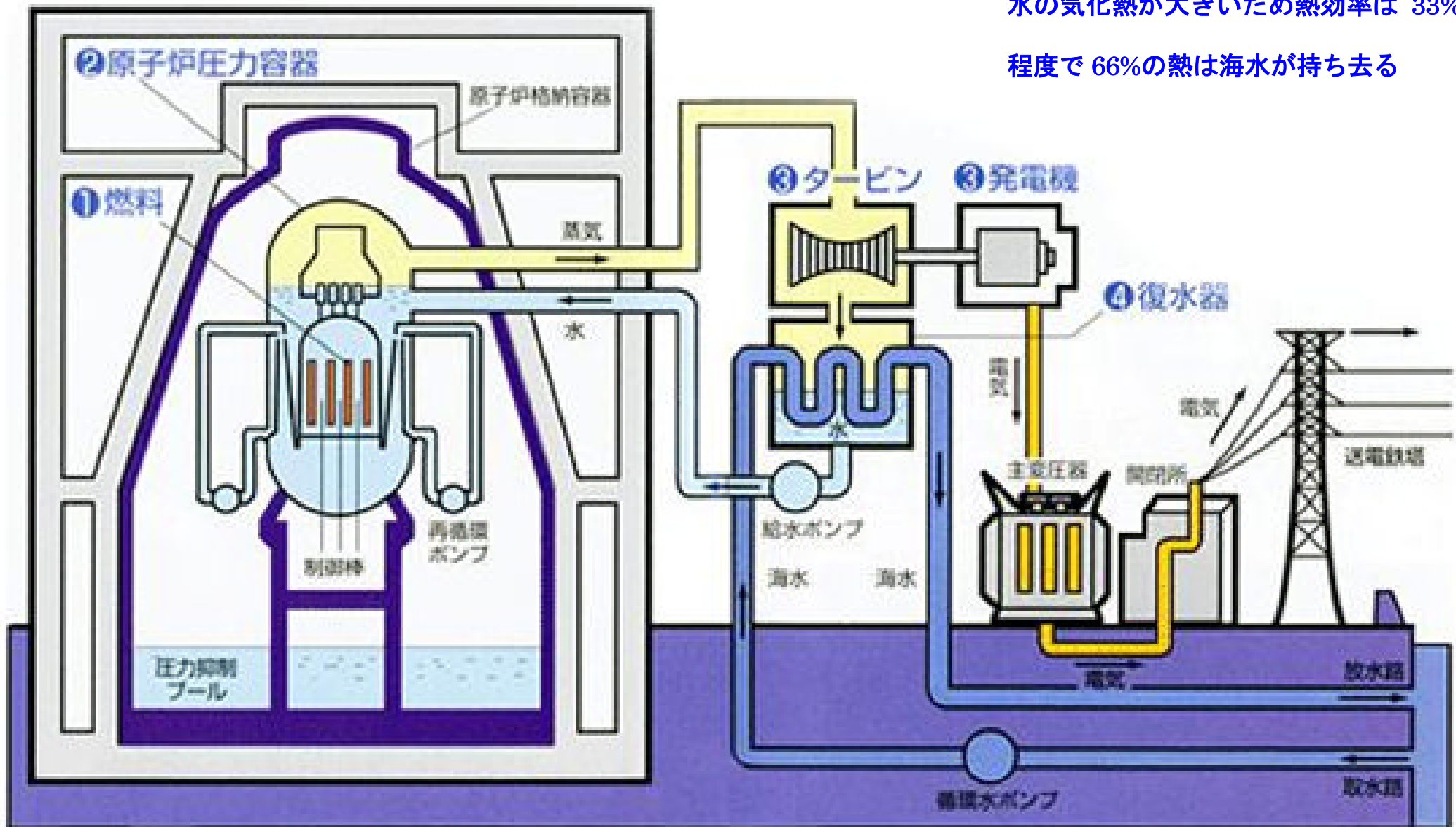
		1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機	
プラント 主要諸元	電気出力(万kW)	46	78.4				110	
	原子炉形式	沸騰水型軽水炉(BWR)				熱効率 33%		
	格納容器形式	マークI				マークII		
原 子 炉	熱出力(万kW)	138	238.1				329.3	
	燃料集合体数(体)	400	548				764	
	燃料集合体全長(m)	約4.35	約4.47				約4.47	
	制御棒本数(本)	97	137				185	
	圧力 容器	内径(m)	約4.8	約5.6				約6.4
		全高(m)	約20	約22				23
		全重量(t)	440	500				750
	格納 容器	全高(m)	約32	約33		約34		約48
		円筒部直径(m)	約10	約11				約10(上部)
		球部直径(m)	約18	約20				約25(底部)
圧力抑制プール 水量(t)		1,750	2,980				3,200	
燃 料	種類	二酸化ウラン(3号機のみMOX燃料を含む)						
	ウラン装荷量(t)	69	94				132	
	燃料集合体(本)	400	548				764	
参 考 数 値	★2号機の年間の発電量 : 69億KWH (78.4万kw*24時間*365日) 1725億円 (KW=25円) ★年間平均稼働率を75%とすると 2号機の発電量は 52億KWH 1300億円							



原子力発電所（BWR：沸騰水型）のしくみ

水の気化熱が大きいいため熱効率は 33%

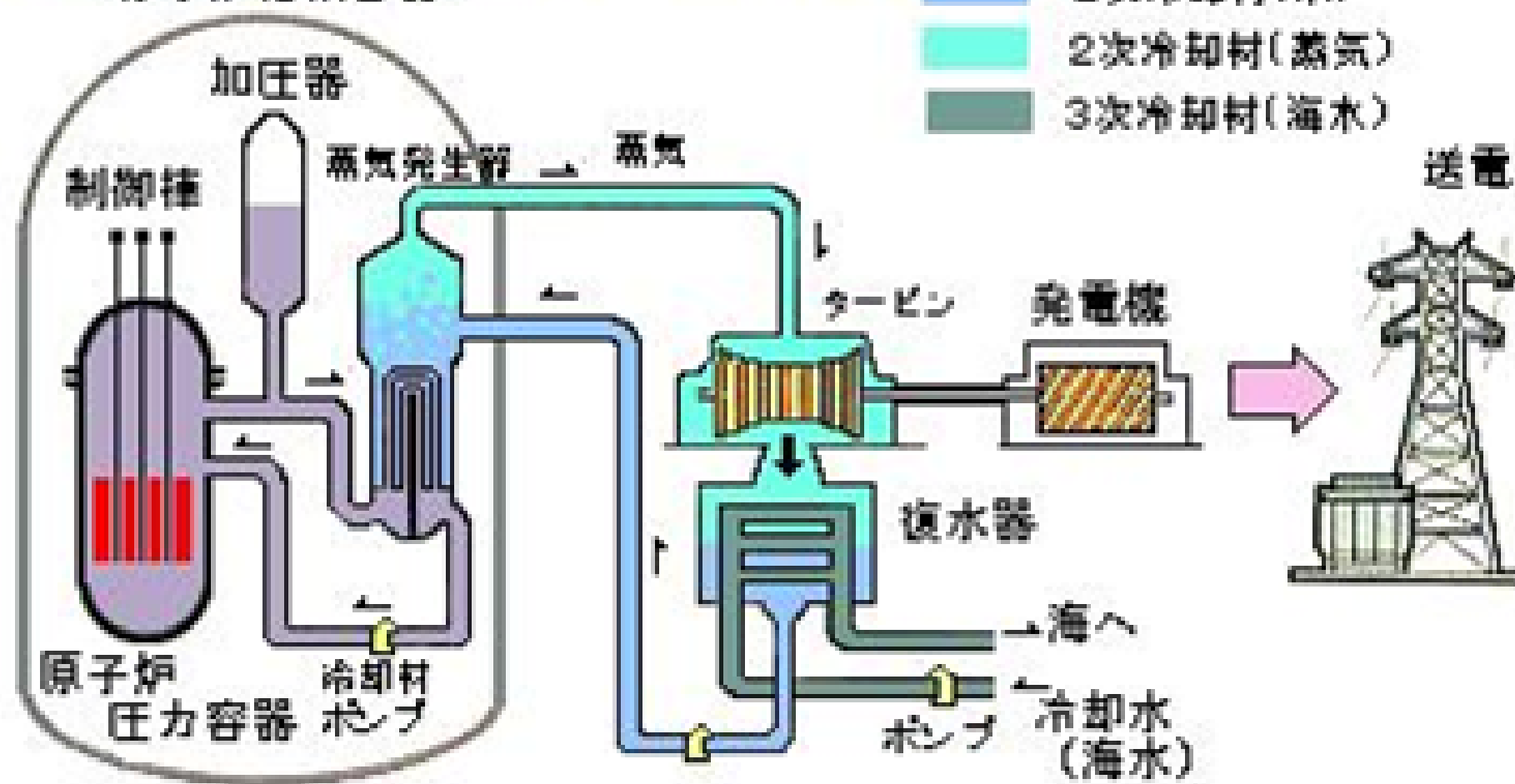
程度で 66%の熱は海水が持ち去る



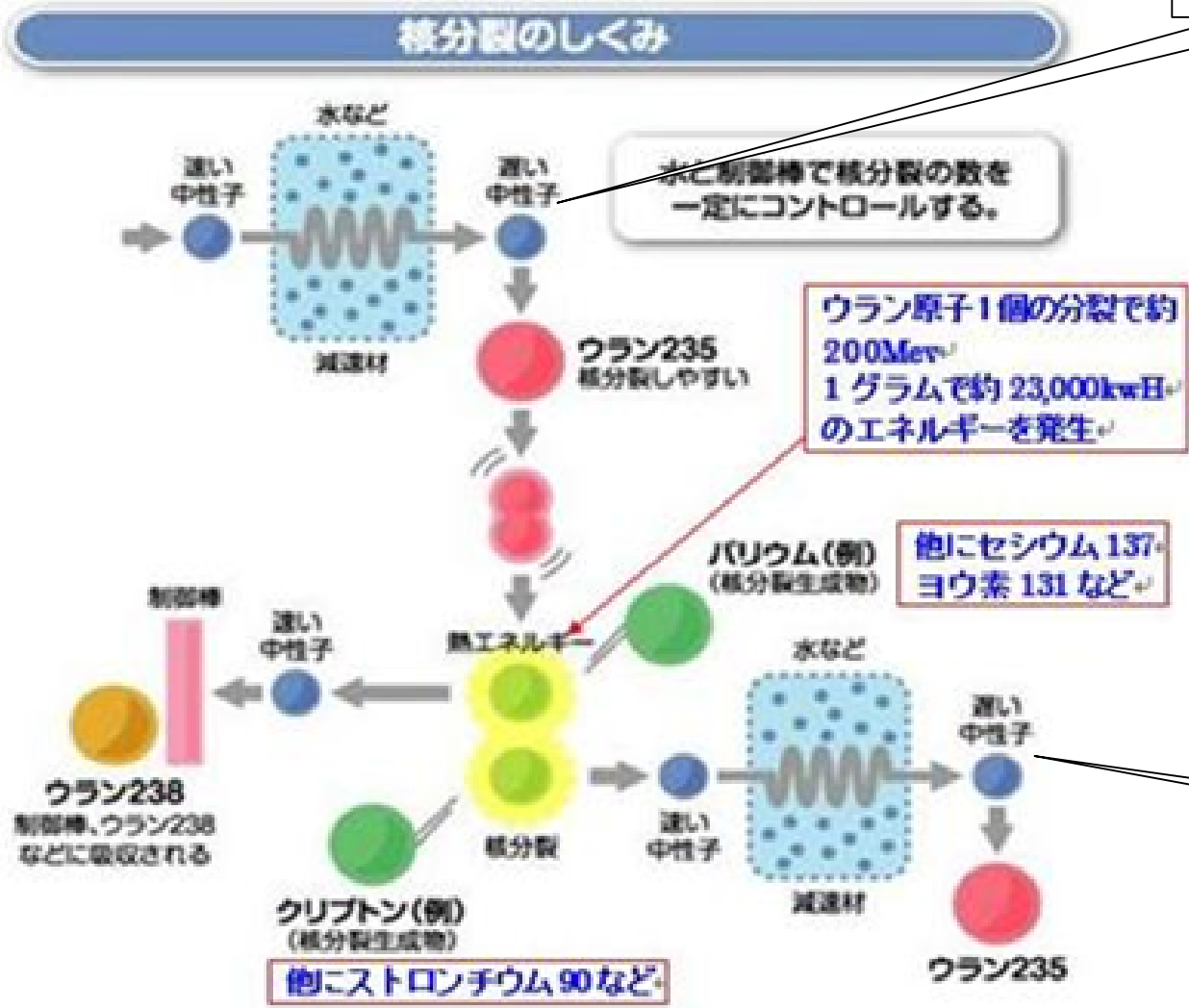
原子力発電所（PWR：加圧水型）のしくみ

■ 加圧水型原子力発電(PWR)のしくみ

原子炉格納容器



核分裂のしくみ



連鎖反応のスタート
(第一世代のスタート)

自発核分裂

質量数が非常に大きな同位体に特徴的に見られる放射性崩壊の一種。中性子がとりこまれなくても核分裂する。ウラン 235 やプルトニウム 239 などにも低い割合だが発生している。

11 月 2 日、福島 2 号機で半減期の短いキセノン 135 が検出され、再臨界と騒がれたが、原子番号 96 のキュリウム Cm の自発核分裂であることが分かった。

第二世代のスタート

核分裂の例

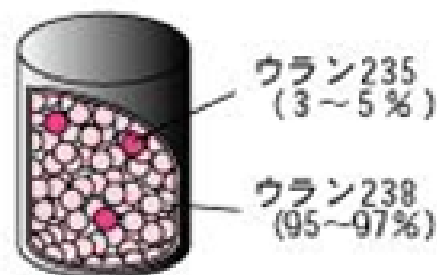
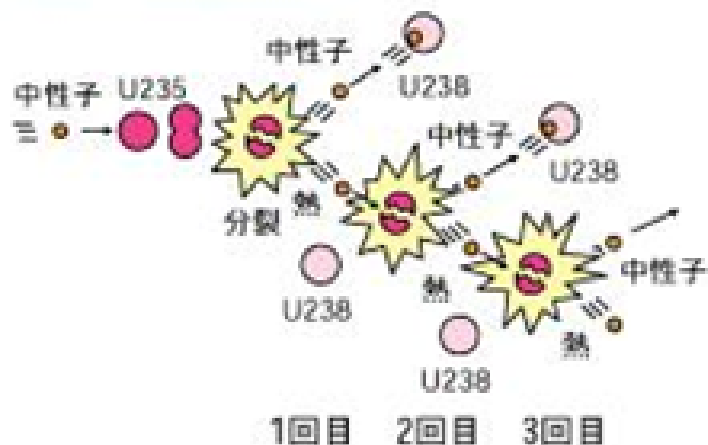


C A原子炉と原爆の違い

C B原子核の結合エネルギー

原子炉と原爆の違い

原子力発電の場合



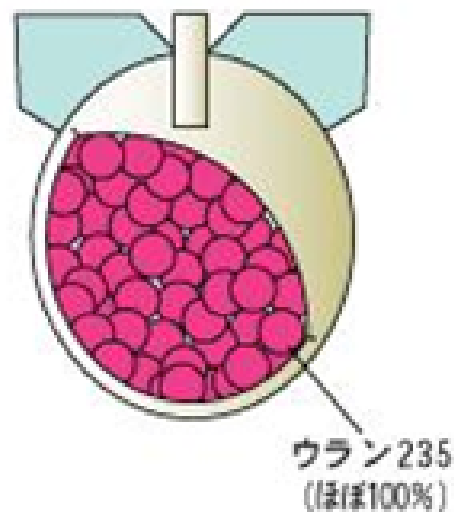
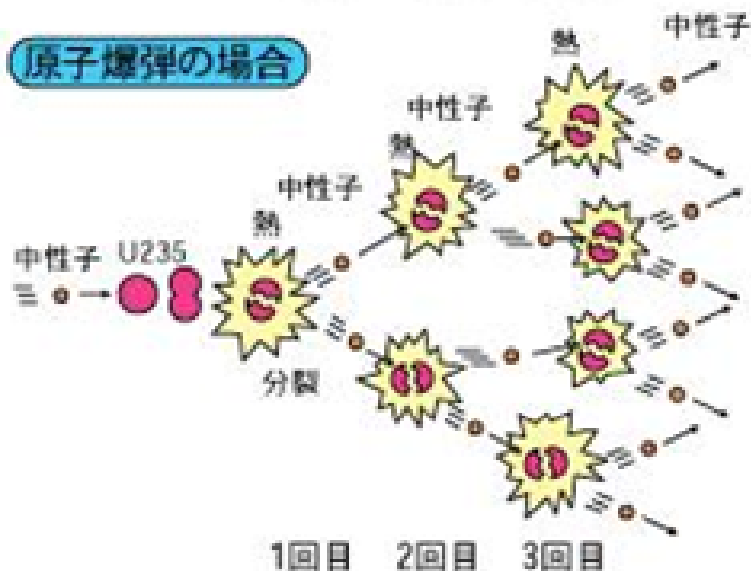
★中性子の速度が違う

- ・原子炉内の中性子の速度は遅い(2.2 km/秒)⇒熱中性子
- ・原爆は核分裂後に減速されないため速い(20,000 km/秒)⇒高速中性子

★中性子が無駄に使われる

- ・原子炉では発生する中性子のうち1個しか次の核分裂に使われない。ほかの中性子は原子炉外に逃げ出したりウラン238や構造材に吸収されてしまう。
- ・原爆はウラン235以外の不純物がないから、中性子のほとんどが次のウラン235に衝突し、短時間で鼠算的(指数関数)に増加し短時間に全ウラン235が核分裂してしまい、無駄に使われることがない。

原子爆弾の場合



元素の周期律表

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*1	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	*2	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo

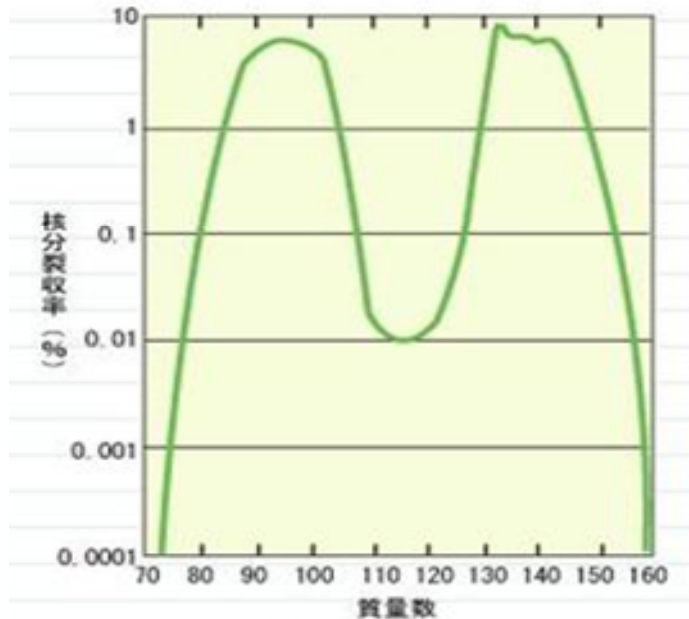
*1 ランタノイド:

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

*2 アクチノイド:

89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

核分裂生成物の生成割合



核分裂生成物の分布
(ウラン-235が熱中性子で分裂する場合)

核分裂生成物の分布↓

ウラン-235 が熱中性子を吸収して分裂した場合に生ずる核分裂生成物の分布を示したものが下図である。このように質量数 90 - 100 および 135 - 145 の附近に2つの山をもつ形となることは、大体3 : 2ぐらいに割れる確率が大いことを示している。↓

またウラン-235 以外の核分裂性核種は、値が幾分違うが大体同様な傾向を示す。高速中性子による核分裂では中央の谷が、ずっと浅くなって真半分に分れる確率の増加が認められる。↵

ウラン 235 の核分裂による主な核分裂生成物

生成物	収率	半減期	安定になるまで 放射エネルギー
C s セシウム 133	6.79%	安定	
I ヨウ素 135	6.33%	6.57h	
Z r ジルコニウム 93	6.30%	1.53My	
C s セシウム 137	6.09%	30.17y	$^{137}\text{Cs} \Rightarrow ^{137\text{m}}\text{Ba} \Rightarrow ^{137}\text{Ba}$ (安定) β0.5Mev γ0.67Mev($T_{1/2}$:2.5m)
T c テクネチウム 99	6.05%	211ky	
S r ストロンチウム 90	5.75%	28.9y	
I ヨウ素 131	2.83%	8.02d	$^{131}\text{I} \Rightarrow ^{131\text{m}}\text{Xe} \Rightarrow ^{131}\text{Xe}$ (安定) β0.6Mev γ0.03Mev($T_{1/2}$:12d)
P r プロメチウム 147	2.27%	2.62d	
S m サマリウム 149	1.09%	安定	
I ヨウ素 129	0.66%	15.7My	

炉内でウラン 238 からプルトニウムのできる過程

Puプルトニウム239		241ky	$^{238}\text{U} + n \Rightarrow ^{239}\text{Np} \Rightarrow ^{239}\text{Pu}$ ^{239}Np ($T_{1/2}$:2.3d) Pu:α5.2Mev
-------------	--	-------	---

核分裂と崩壊熱のしくみ

★代表的な核分裂反応の一例を示す



核分裂で放出されるエネルギー

★ウラン原子 1 個の分裂のとき放出されるエネルギーは約 200 MeV で、一般的な化学反応（燃焼）の 250 万倍程度

★ウラン 235 の 1 g 核分裂を起こすと約 23,000 KWH の熱量相当を放出する

核分裂で放出されるエネルギーの放出形態

★93～94%は核分裂破片や中性子の運動エネルギーやガンマ線として瞬時に放出

★6～7%は核分裂生成物の放射能としてゆっくり放出

★原子炉が停止（核分裂が停止）すると93%は即座にエネルギーの放出はなくなるが、残り7%は時間をかけてゆっくり放出される（これが崩壊熱）。

核分裂生成物は安定な同位元素になるまで放射線を出し続ける

★代表的な核分裂生成物の崩壊反応の一例を示す



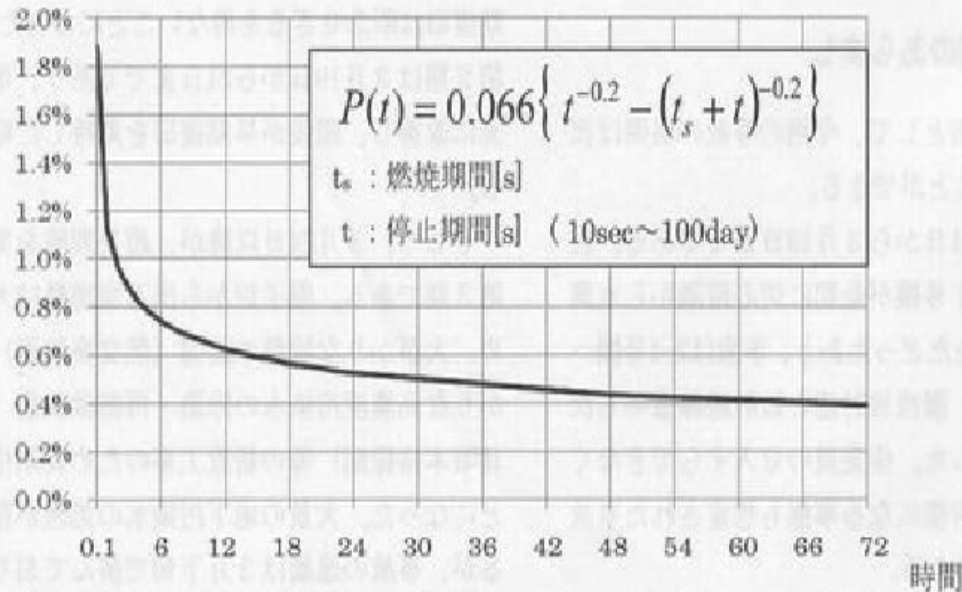
★原子炉停止後も長期に冷却を続ける必要がある。

[F B 崩壊熱の計算](#)

[D 元素の周期律表](#)

崩壊熱の計算

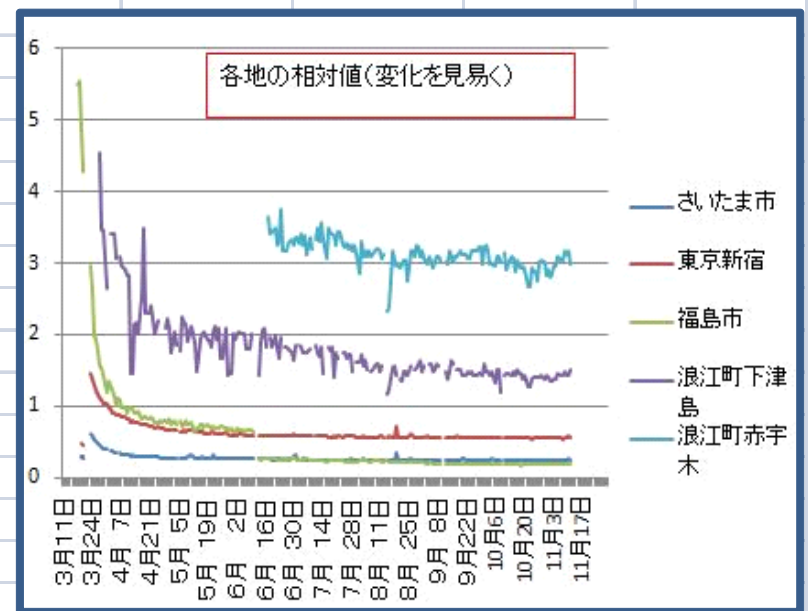
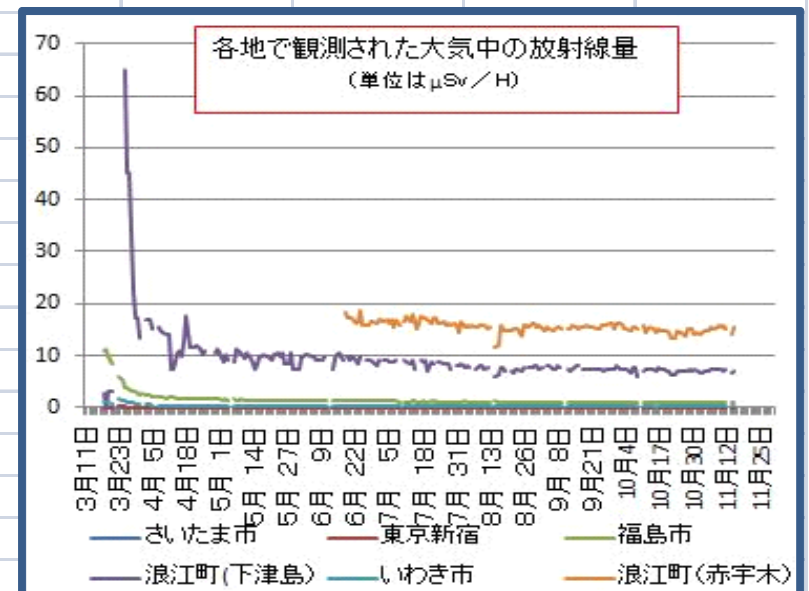
図1. 原子炉停止直後の崩壊熱 (近似式のグラフ)



McMaster Nuclear Reactor, McMaster University, "Decay Heat Estimates for MNR",
 Technical Report 1998-03 (<http://www.nuceng.ca/papers/decayhelb.pdf>) より

	入力(日)	秒換算	計算値	計算例は福島2号機が1年間運転し、停止後3日経ったときの崩壊熱(%及びKW)を示す 熱効率は33%として計算
燃焼期間	365	31536000		
停止期間	3	259200		
崩壊熱(%)			0.33704	
電気出力(万KW)	78.4			
崩壊熱(KW)			8007.36	

崩壊熱の減衰曲線は全ての核分裂生成物の減衰曲線の和である。



燃料の燃焼の結果

★2号機の年間の発電量 : 69 億 KWH 約 1700 億円

年間平均稼働率を 75% とすると 2号機の発電量は

52 億 KWH 1300 億円 [3 福島第一原発の設備概要](#)

★発電量を炉内の発生熱量に置き換えると

約 150 億 KWH (52 億 KWH/熱効率 0.33)

★ウラン 1g の発生熱量は約 23,000KWH だから

150 億 KWH は 核燃料物質約 650kg に相当する

650kg のウラン、プルトニウムが分裂すればほぼ同重量の核分裂生成物が発生する

[E 核分裂生成物の生成割合](#)

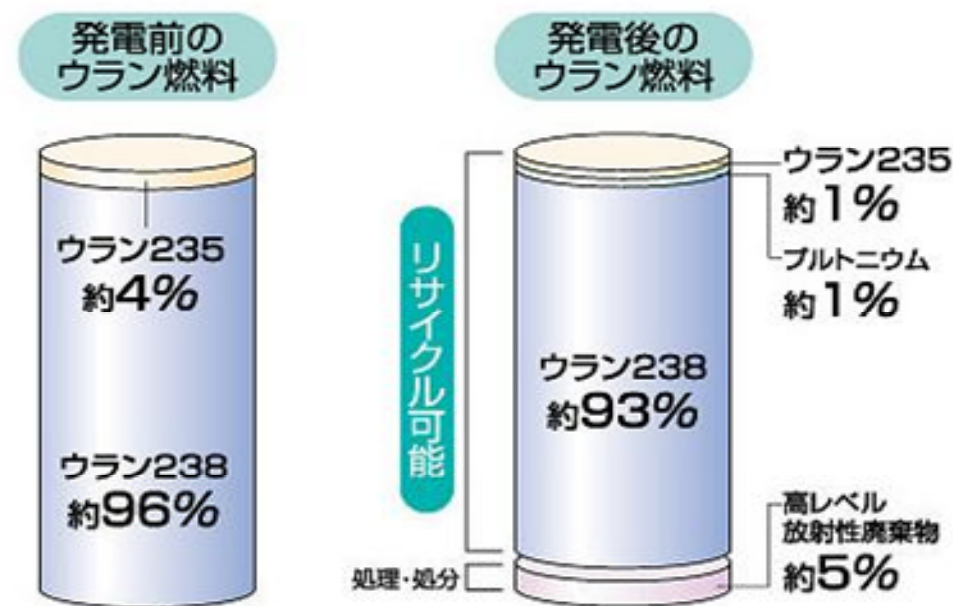
★セシウム 137 は核分裂発生量の約 6.1%だから約 40kg が 1 年間に炉内に発生する

燃料が炉内に平均して 2 年間存在するから 2号機の炉内には約 80kg のセシウム 137 がある

★燃料の燃焼末期には核燃料物質が 5%減少する。核分裂しないはずのウラン 238 は

3%が中性子を吸収してプルトニウム 239 に変わり、発生したプルトニウム 239 のう

ち 2%分は燃焼し、1%が使用済み燃料の中に残っている (再処理時に再使用される)



燃焼した量

ウラン 235	:	4%⇒	1% =	3%
ウラン 238	:	96%⇒	93% =	3%
プルトニウム	:	0%⇒	1% =	-1%

原子炉建屋

原子炉建屋

コンクリート厚さ 1 ～ 2 m

原子炉格納容器 (ドライウェル)

鋼鉄厚さ 3cm

原子炉圧力容器

鋼鉄厚さ 16cm

原子炉格納容器 (圧力抑制室: サプレッションチャンバー)

水量 1号機 約2000トン

2～4号機 約3000トン

使用済燃料プール

深さ 11m

広さ 8mX15m

水量 約1200トン

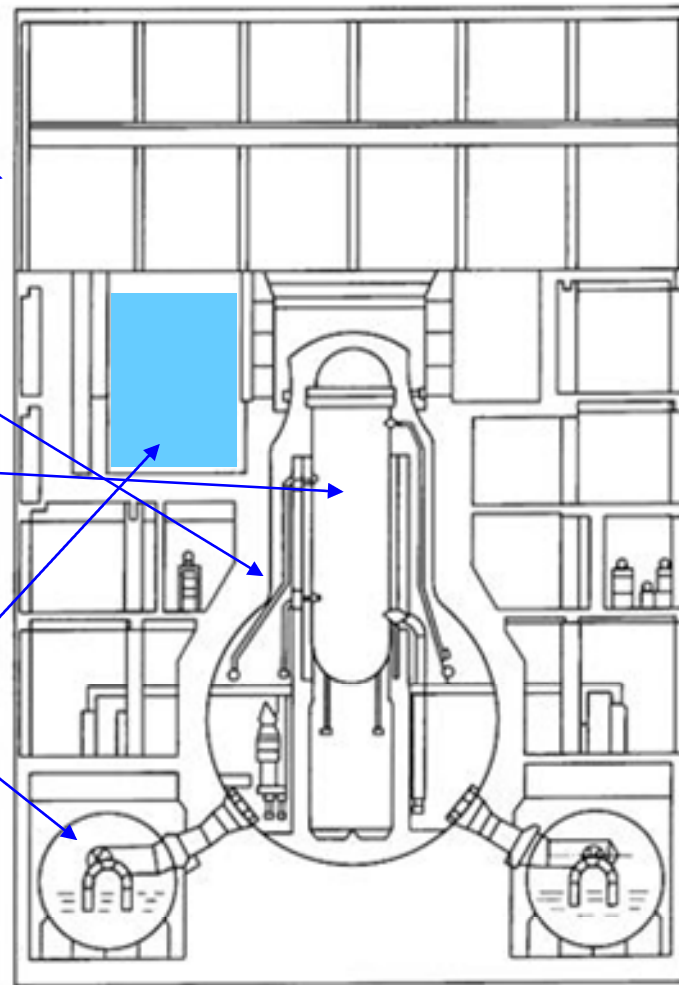
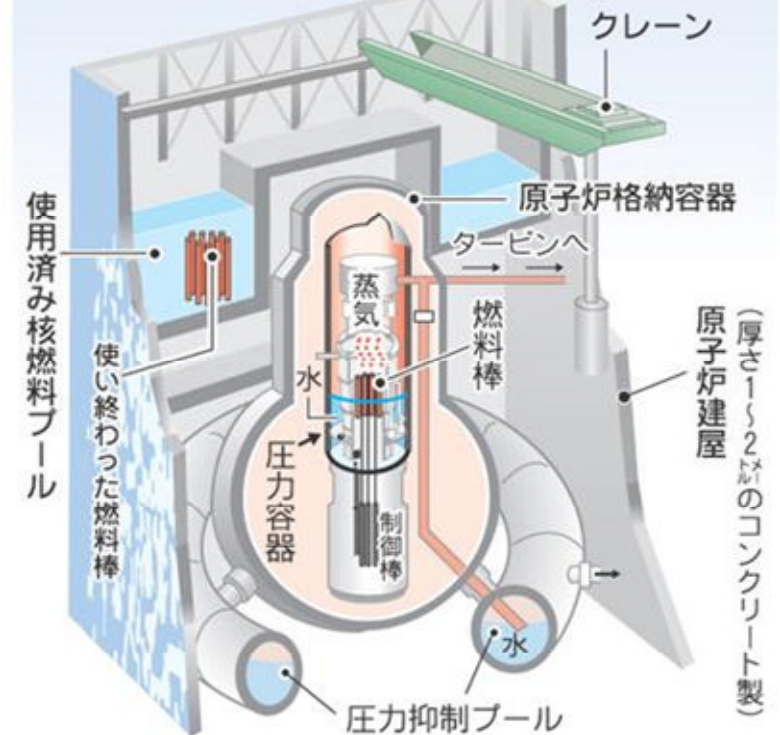


図1 Mark-I型格納容器

[出典] 原子力安全研究協会(編): 軽水炉発電所のあらまし(改訂版)、
原子力安全研究協会(1992年10月)

原子炉建屋の構造



KA原子炉建屋の設計思想

原子炉压力容器と原子炉格納容器

原子炉格納容器および隔離弁

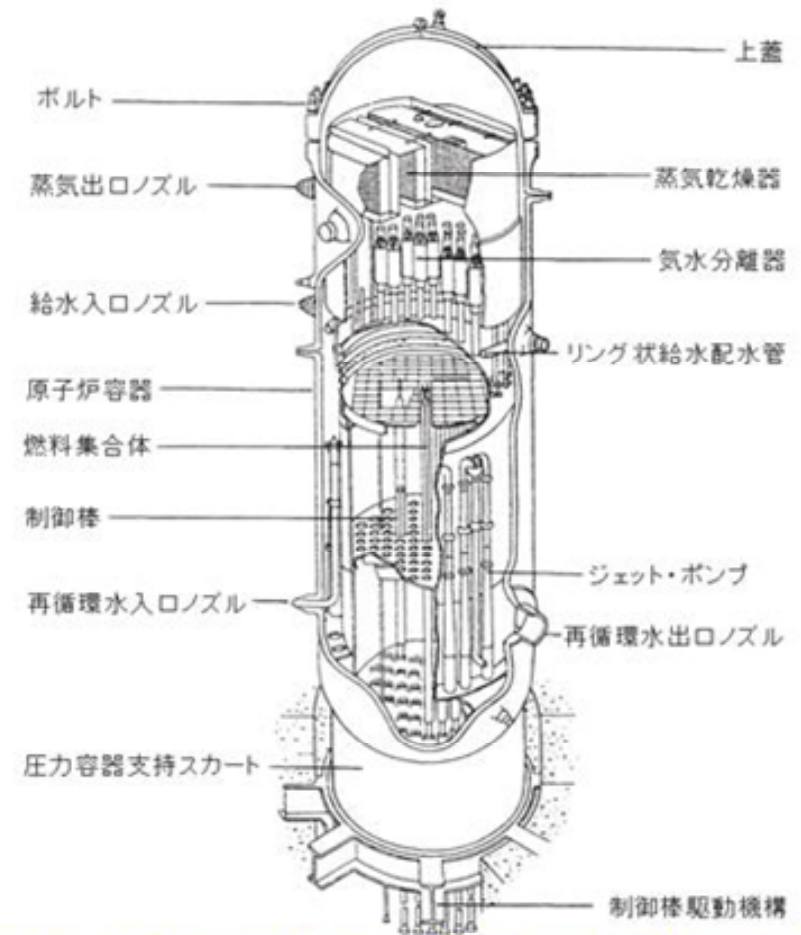
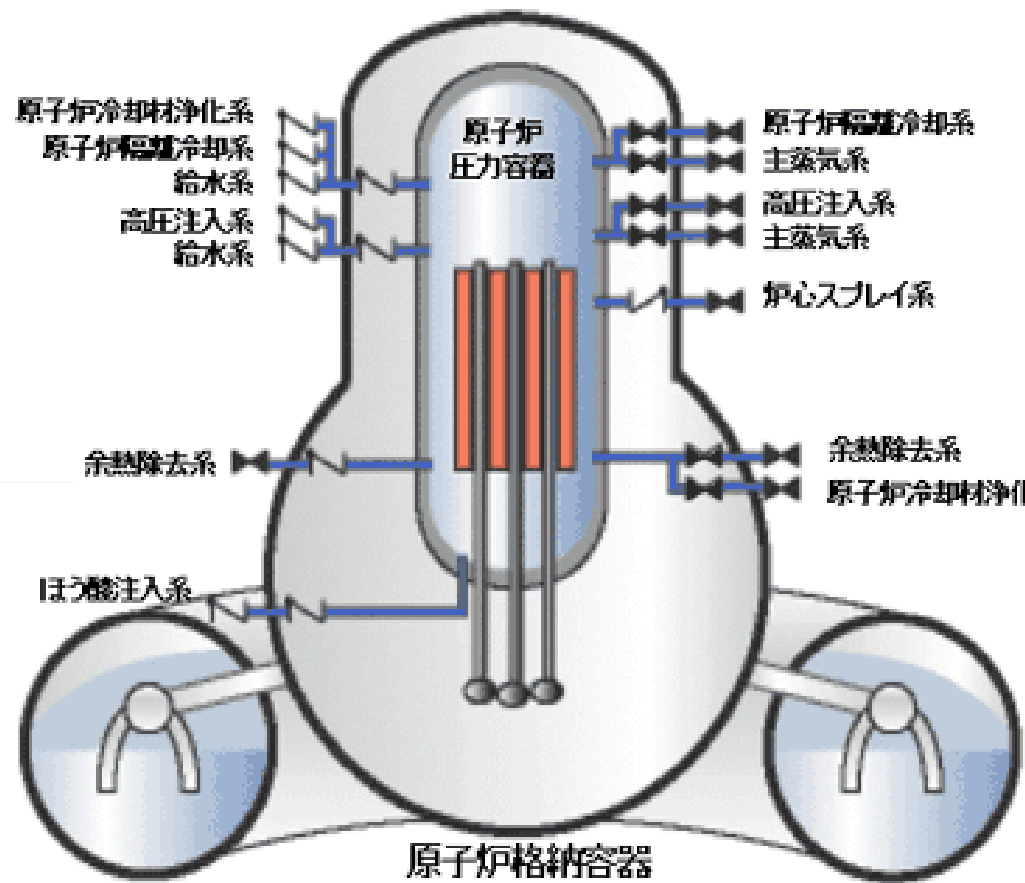
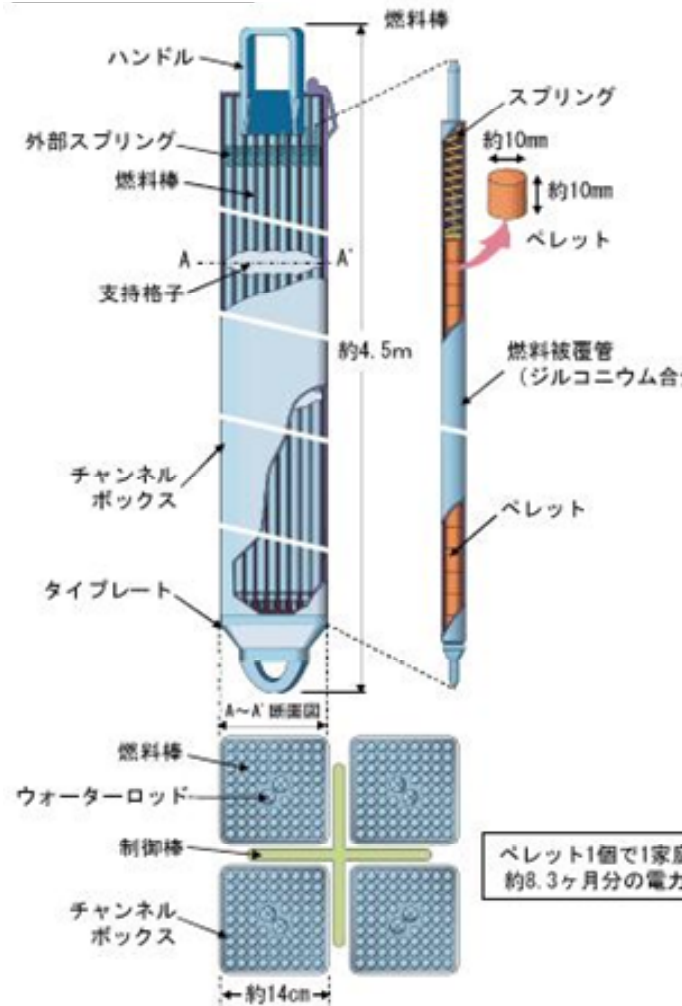


図7 沸騰水型原子力発電所の原子炉(圧力)容器内構造

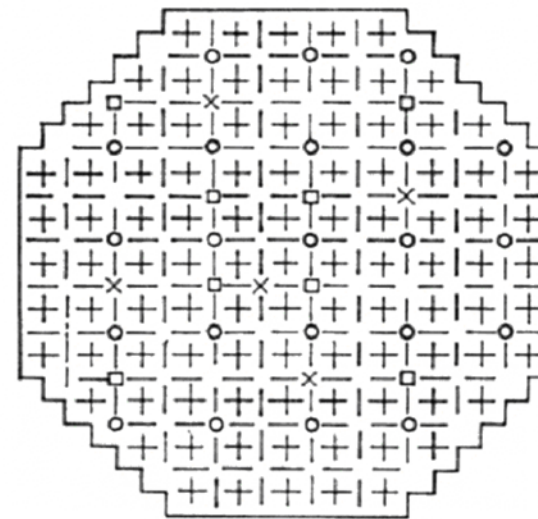
[出典]立花昭:原子力発電と動力用原子炉(原子力の基礎講座3)、日本原子力文化振興財団(1984年3月)、p.39

燃料集合体と制御棒

燃料集合体



炉心(福島1号)



制御棒 96本 □ 中間領域検出器 8個
 中性子源 4個 中性子源領域 4個
 燃料棒 400本 ○ 出力領域検出器 22体
 出力領域検出器は上下4本組を1体として炉心に22体配置される

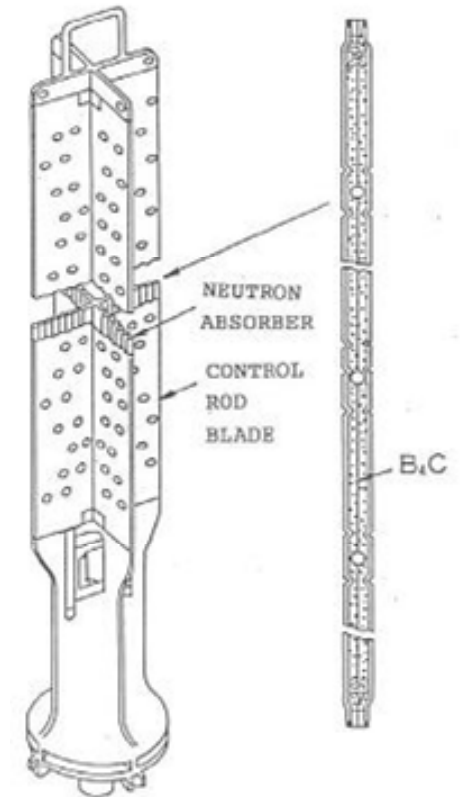
図5 BWR炉心と中性子検出器の配置図 (460MW級原子炉)

[出典]電気計算: 記念特集 図で説く原子力発電所とその運転、電気書院(1972)

燃料ペレットは二酸化ウラン UO_2 を焼結しセラミック状にしたもの: 核分裂生成物を閉じ込める

ジルコニウムは熱中性子を殆ど吸収しない

制御棒

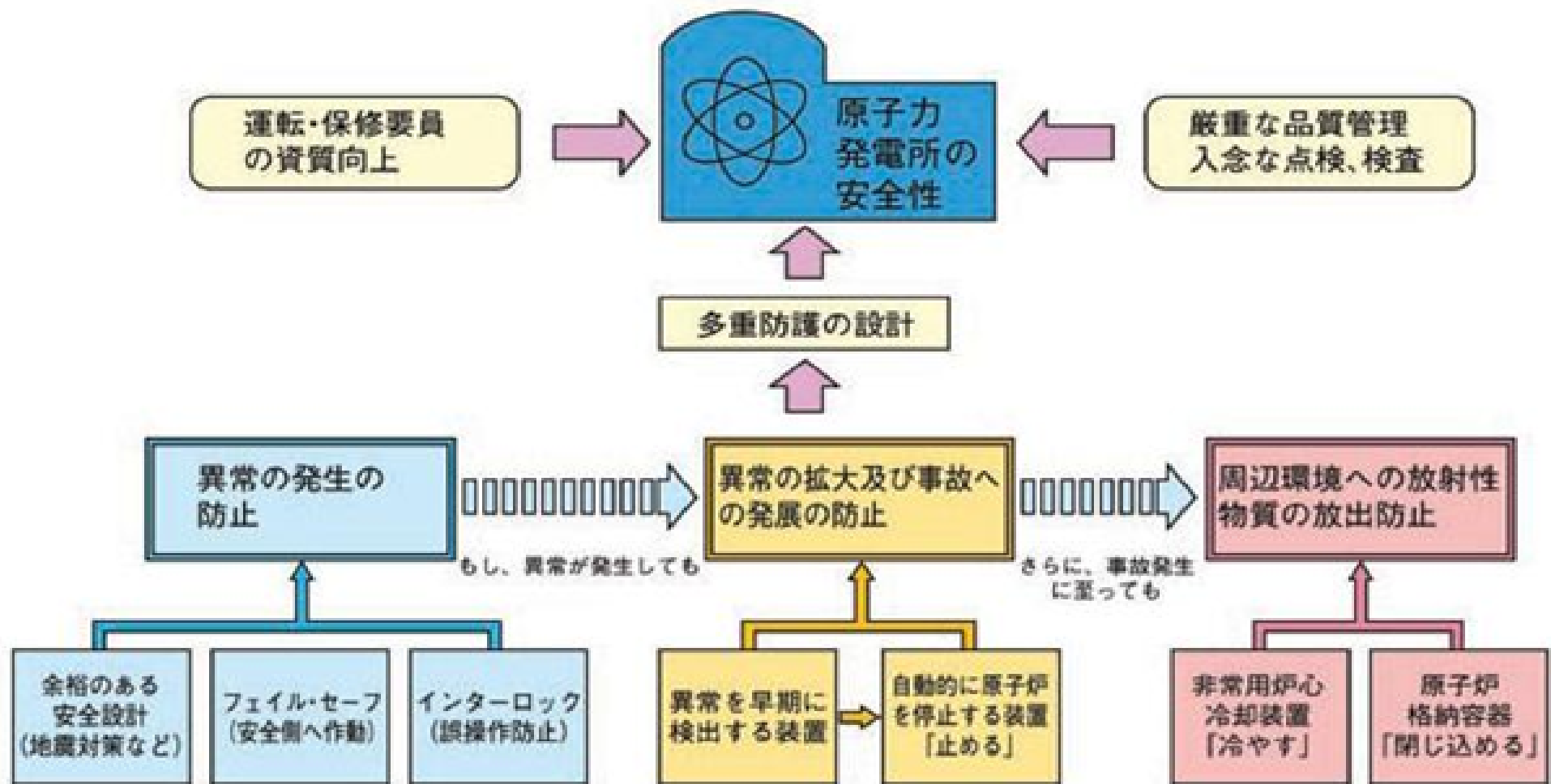


制御棒の主成分は熱中性子を非常によく吸収するホウ素を B_4C の粉末にしたもの

原子力発電所の安全設計指針

前提条件として制御、計測、動力用の電源が使えること。電源も通常電源にたいし、予備電源、非常用電源でバックアップされていてどれかは必ず生き残っているという設計になっている。

[GA原子炉を自動停止させる信号](#)



原子炉を自動停止させる信号

- ★原子炉は右の信号のどれか一つが発せられると自動停止（スクラム）させられる。
- ★フェイルセーフの考え方で常に正常な計測器の信号が流れていて、異常信号や信号が流れなくなるとスクラムさせる。
- ★異常状態を検知する検出器は複数設置されていて幅広く監視する。
- ★ただし、実際の減少ではない、計測器の単一の不具合でスクラムしないように制御回路が組まれている。

（例）**2 out of 3**：3つの計測機のうち2つが働かないとスクラム信号は出さない。1つの計測器がスクラム信号を誤って出してもスクラムしないし、スクラム信号が出せなくなっても2つの正常な計測器がスクラム信号を出せばスクラムする。

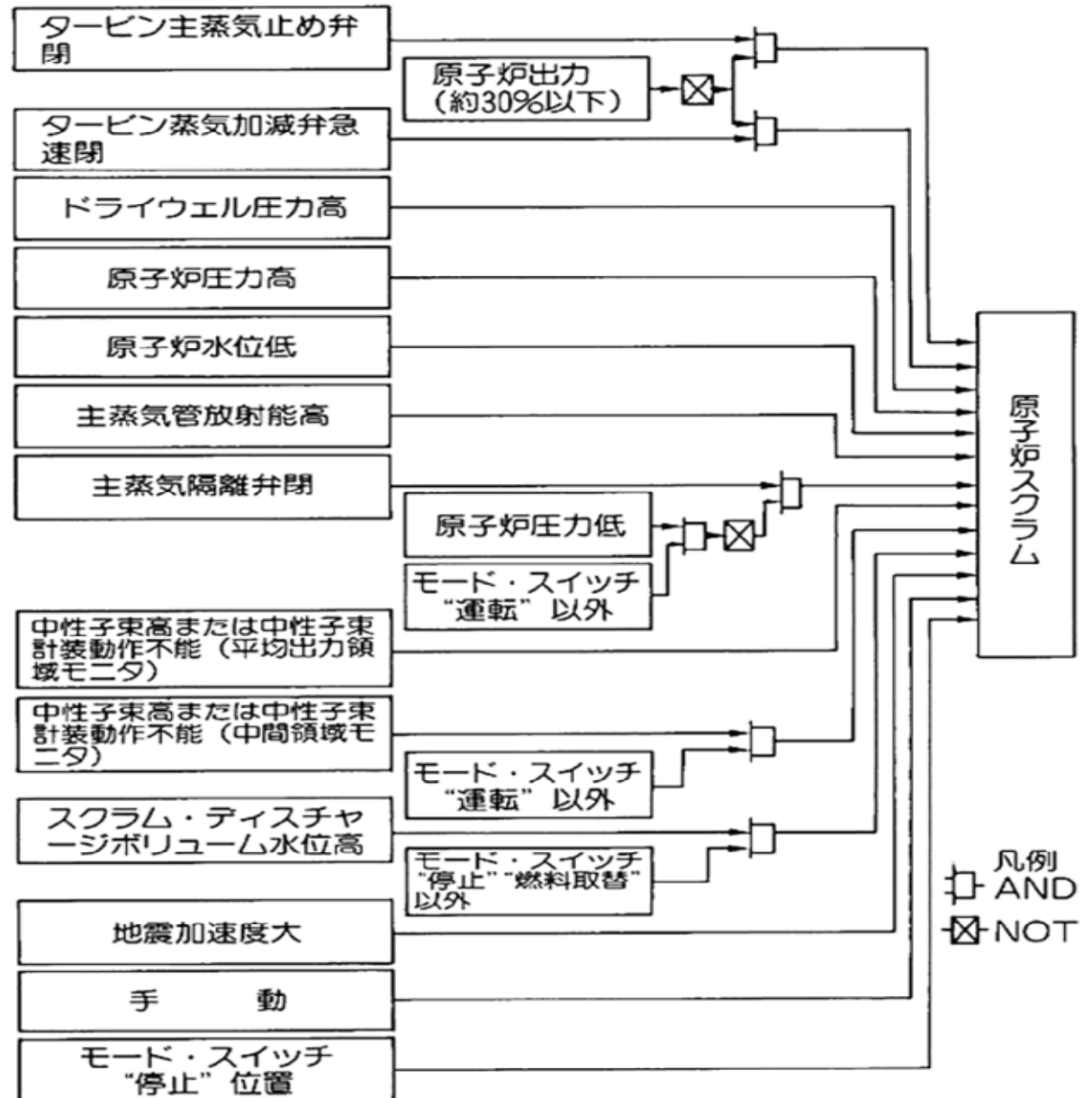
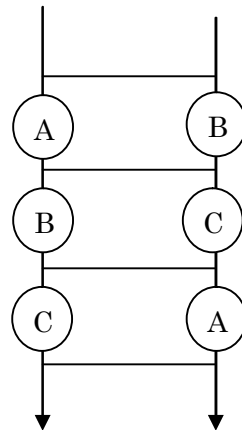


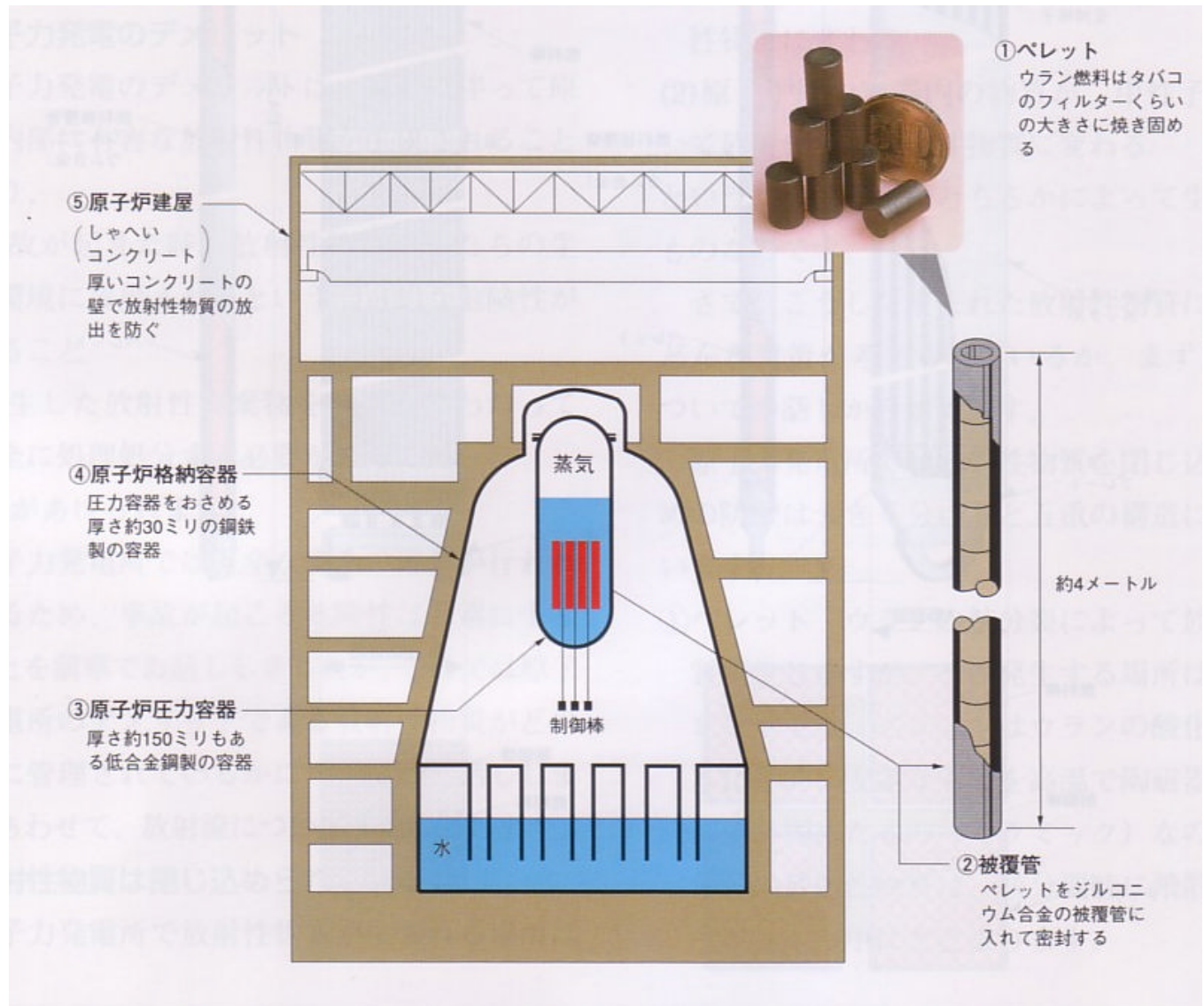
図1 BWRの原子炉スクラム信号

【出典】東京電力：福島第二原子力発電所原子炉設置許可申請書（昭和53年12月）

核分裂生成物を閉じ込める5重の障壁

- ① UO_2 焼結ペレット (セラミック)
- ② ジルコニウム合金筒
- ③ 原子炉压力容器 鋼鉄の密閉容器
- ④ 原子炉格納容器 鋼鉄の密閉容器
- ⑤ 原子炉建屋 大気圧より水柱数mm
負圧にしてが生きへの漏れ出しを防ぐ 出入り口エアロック (二重扉)

★使用済燃料貯蔵プールに関しては発熱量が小さいため ③、④ の障壁はない。



非常用炉心冷却系

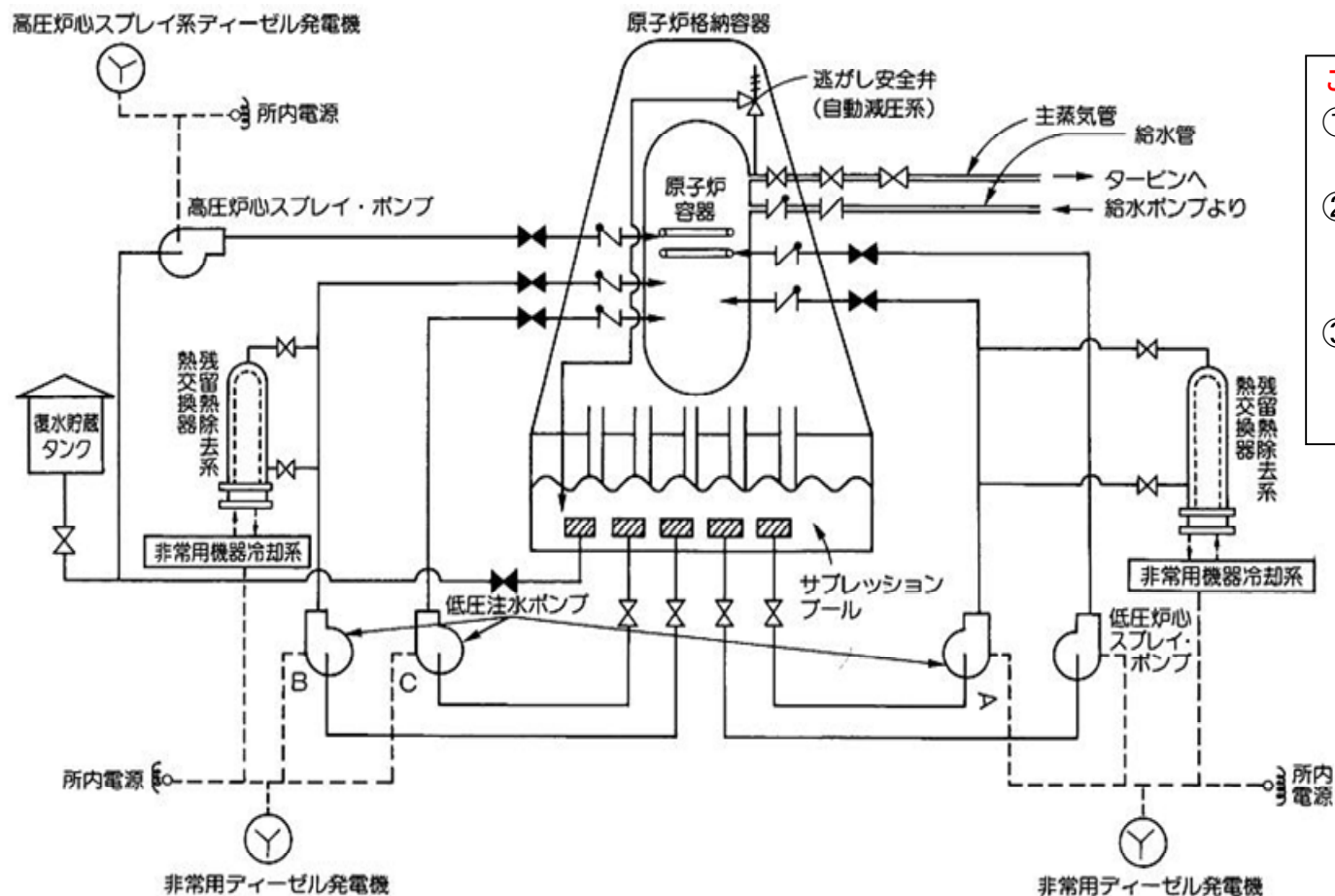


図1 BWR非常用炉心冷却系

非常時に炉心の燃料が空焚きにならないように炉心に冷却水を送る系
複数のシステムが複数の系統をもつ 何れも電源が必要

このほかの非常用設備

- ① 可燃ガス濃度制御系：格納容器内の水素を処理する設備
- ② 非常用ガス処理系：格納容器内の気体を排出する場合に放射性物質を除くための設備
- ③ 残留熱除去系及び残留熱除去海水系：原子炉が隔離された時、炉心を冷やす冷却水を冷やす設備

[N A原子炉系主要構成](#)

[N B原子炉隔離時の熱除去系](#)

多重の電源系

★所内で使う電力は次の3つの独立した電力用交流系統と直流電源系を持つ

- ① 主発電機の電力あるいは主送電線から電力を受ける（所内の動力すべてに給電できる）
- ② 送電線系統とは別の予備送電線から電力を受ける。（停止に必要な動力すべてに給電できる）
- ③ **非常用ディーゼル発電設備および高圧注入系ディーゼル発電設備**（非常用機器のみに給電できる）
- ④ 直流電源系：制御用と一部動力用に使う。蓄電池をもち8時間程度の直流電力を保持できる。

通常の所内交流電力は①を使い、①が使えない時は所内動力は自動的に②に切り替えられる。非常時など①、②が使えない時に③が自動的に所内動力を引き受ける。

※電力は非常時用設備（非常時の炉心冷却など）を支える根源であり、発電所の所設備は非常時でも電源が確保されていることが前提だった 非常用電源は100%容量を2系統持ち、2系統とも使用不能になることはないように設計されていた はずだった！

チェルノブイリ原発事故

★旧ソ連(現・ウクライナ)のチェルノブイリ原発 4 号機(黒鉛減速軽水冷却チャンネル型炉)で 1986 年 4 月 26 日に起きた原子炉暴走・爆発事故。5 月 6 日まで大規模な放射性物質の放出が続いた。

★運転中の原子炉で電源喪失の対応実験中に出力が急上昇し、作業員のミスも重なって、高熱の炉心がむき出しになり、**放射性物質は計 11 エクサベクレル(エクサは 100 京倍を表す単位=10 の 18 乗)が放出された。** 膨大な量であり、広島に投下された原子爆弾の 500 倍ともいわれる。

★セシウム 137 で 1 平方キロメートル当たり 370 億ベクレル以上汚染された地域はウクライナ、ベラルーシ、ロシアの計 10 万平方キロメートル近くに達した。半径 **30km の住民 11 万 6000 人が強制避難**させられ、多くの村が廃墟となった。欧州各地でも食物が汚染されて大量に処分され、全世界で放射能が観測された。

★爆発した 4 号機をコンクリートで封じ込める「石棺」建設のために、延べ 80 万人が動員された。事故直後に消防士ら 31 人が死亡し、急性放射性障害で 203 人が入院した。2001 年にロシア副首相が、事故処理作業をした旧ソ連の 5 万 5000 人が放射線障害で死亡との推計を発表した。05 年には国際原子力機関(IAEA)と専門家グループによる「チェルノブイリ・フォーラム」が、事故処理作業員と高濃度汚染地域の住民の今後を含めた死者は 4000 人との推計を発表した。06 年になって世界保健機関(WHO)は対象地域を広げて死者 9000 人とし、国際がん研究機関は欧州全域を含めて 1 万 6000 人、環境団体のグリーンピースは 9 万人と発表した。



スリーマイル島原発事故

- ★米国ペンシルベニア州のスリーマイル島原発 2号機(加圧水型軽水炉、95.9万kW)で1979年3月28日に起きた事故。
- ★機器の故障と人為的ミスがいくつも重なった。二次冷却水ポンプの故障に始まり、開いているべき弁が閉じたままだったこと、加圧器の圧力逃し弁が開きっぱなしになったこと、稼働した緊急炉心冷却装置(ECCS)を運転員が止めたことなど。事故が拡大した最大の要因は、一次冷却水が十分あると誤判断した運転員がECCSを停止させたことだ。その結果、圧力容器内から冷却水が流失し、炉心の3分の2が露出する空焚(からだ)き状態になった。
- ★後の調査で炉心の半分が溶けていたことが分かった。非常事態が宣言され、付近の住民が避難した。
- ★この事故で大気中に放出された放射性物質は、**希ガスが約93ペタ(1000兆)ベクレル(Bq)、ヨウ素が約0.56テラ(一兆)ベクレル程度**。周辺住民の被曝(ひばく)線量は1mSv(ミリシーベルト)以下で、健康に与える影響はほとんどないとされる。

