

対話イン福井工業大学2018 基調講演

原子力に携わって50年 ～次世代に伝えたいこと～

2018年10月26日 福井工業大学福井キャンパス

元三菱重工、SNW運営委員

矢野 隆

講師の自己紹介（2018年現在）

- 矢野 隆 やの たかし
 - 1948年 広島県生まれ
 - 1967年 大阪大学入学、原子力工学専攻
 - 1971年 卒業と同時に三菱原子力工業入社、
日本原子力学会 正会員
入社以来、FBR Na技術開発、高温ガス炉概念設計、
PWR換気空調設備・事故時水素制御設備設計、
原子燃料サイクル施設安全設計等に従事
 - 2010年 米国勤務（2年半）
 - 2013年 シニアネットワーク連絡会（SNW）での本格活動開始
 - 2018年 日本原子力学会 シルバー会員
 - 現在、SNWおよびエネルギー問題に発言する会の運営委員
- 原子力に携わって50年**





本日の内容

1. はじめに
2. 基本設計段階での安全確保の基本
3. 世界の原子力発電所の事故事例と教訓
4. 原子力発電の必要性
5. 本日の纏め

1. はじめに

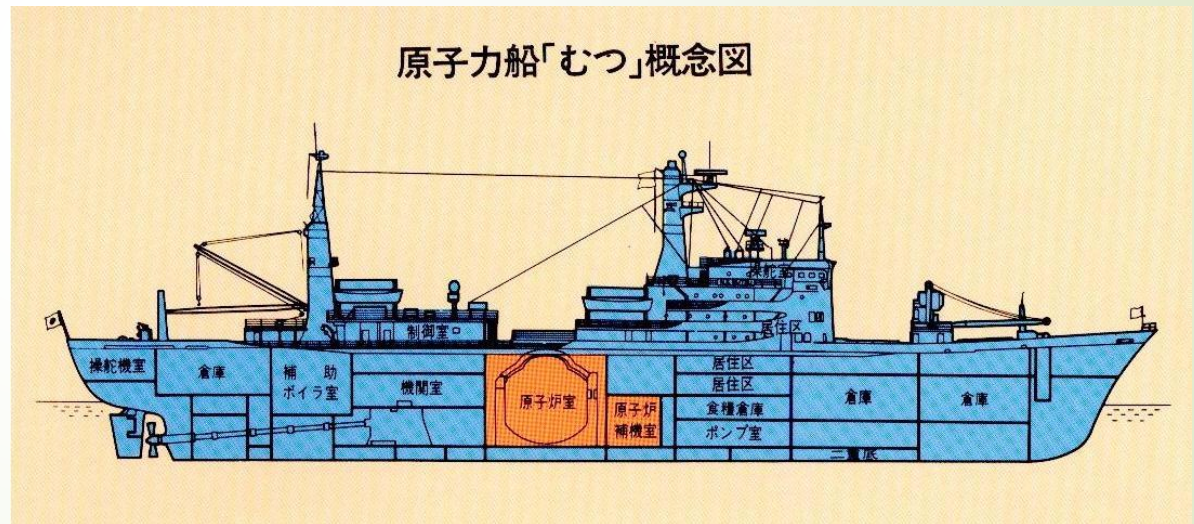
- ・原子力工学を志した1960年代後半は、多くの原子力エネルギーの利用が考えられていた。
- ・1950年代末からの原子力自動車開発
- ・1960年代から70年代にかけて、民間船舶への原子力動力の導入計画

貨客船 サヴァンナ

鉍石運搬船 オットー・ハーン

貨物船 むつ

- ・アニメでは鉄腕アトム
- ・小さな質量で大きなエネルギーを生む。



クイズ (その1)

“小さな質量で大きなエネルギーを生む”のは核分裂反応によるためだが、では、電気出力118万kWの原子炉の炉心は、毎秒どれくらいの核分裂(Fission/秒)を生じているのか？

次の3つの中から選んでください。

(A) 3.7×10^{10} (B) 1×10^{20} (C) 6×10^{23}

解答（その1）

正解：(B) 1×10^{20}

電気出力118万kWe（熱出力はその約3倍）の原子炉は、
毎秒約 1×10^{20} の核分裂を生じている。

これは、1モルの $1/6000$ であり、換言すれば、
1モルのU235（235g）で6000秒間（約1.7時間）、熱を出
し続けるということになる。

2. 基本設計段階での安全確保の基本

- (1) 多くの法律や規制・基準を遵守する。 (詳細を後述)
- (2) 設計内容について国から厳格な審査を受ける。
- (3) 深層防護、すなわち異常の発生防止、事故への拡大防止、放射性物質の異常放出防止の機能を有する。 (参考図)
- (4) 安全機能を有する設備は多重性を確保する。 (参考図)
原子炉は自己制御性という固有の安全性を有する。 (参考図)
発電所は地盤が安定し、揺れにくい特徴がある。 (参考図)
- (5) 安全解析により環境影響を確認する。 (参考図)

(1) 多くの法律や規制・基準を遵守する

- 原子力基本法……原子力の利用が平和の目的に限られること
- 原子炉等規制法……原子炉の設置許可等に関し、規制を行なうことなど
- 安全設計審査指針…原子炉等規制法にもとづく国の審査のための指針

現在は、福島第一事故後に新規制基準が制定され、適合性について審議されている。

新規制基準は、人の安全に加えて環境を守ることを目的に加え、次の対策等が盛り込まれた。

- ・シビアアクシデント対策の義務化、バックフィット制度の導入
- ・大規模な自然災害（火山、竜巻、森林火災）への対応強化
- ・炉心損傷防止対策（共通要因による安全機能喪失発生しても炉心損傷に至らせない）等

- 設置審査（安全設計審査）：原子炉等規制法にもとづく審査を行なう。

製作段階に入る前に、安全設計審査指針の要求を満足していることを確認するもので、この審査指針は、米国の原子力発電所一般設計指針GDCをベースとしている。

(General Design Criteria for Nuclear Power plant Construction Permits)

発生頻度が極小の事象は設計上考慮する必要がないこと、異常時に作動する安全設備はどれか一つの故障を想定すること（単一故障基準）など、**根底に確率論的な考え方がある。**

原子力発電所の新規制基準

〈従来の規制基準〉

シビアアクシデントを防止するための
基準（いわゆる設計基準）
（単一の機器の故障を想定しても
炉心損傷に至らないことを確認）

自然現象に対する考慮
火災に対する考慮
電源の信頼性
その他の設備の性能
耐震・耐津波性能

テロ対策

屋外放水設備

フィルタ・ベント(BWR)

可搬型の電源・注水設備

設計基準の強化
外的事象に対する
考慮の拡大

〈新規制基準〉

意図的な航空機衝突への対応
放射性物質の拡散抑制対策
格納容器破損防止対策
炉心損傷防止対策 (複数の機器の故障を想定)
内部溢水に対する考慮(新設)
自然現象に対する考慮 (火山・竜巻・森林火災を新設)
火災に対する考慮 (難燃性ケーブルの使用等)
電源の信頼性(独立の2回線確保等)
その他の設備の性能 (通信設備の強化等)
耐震・耐津波性能(防潮堤の設置等)

(テロ対策)(シビアアクシデント対策)
新設
新設

強化又は新設

強化

(3)深層防護

原子力施設の安全対策が多段階にわたって設けられていること。

深層防護は、次の3段階からなる。

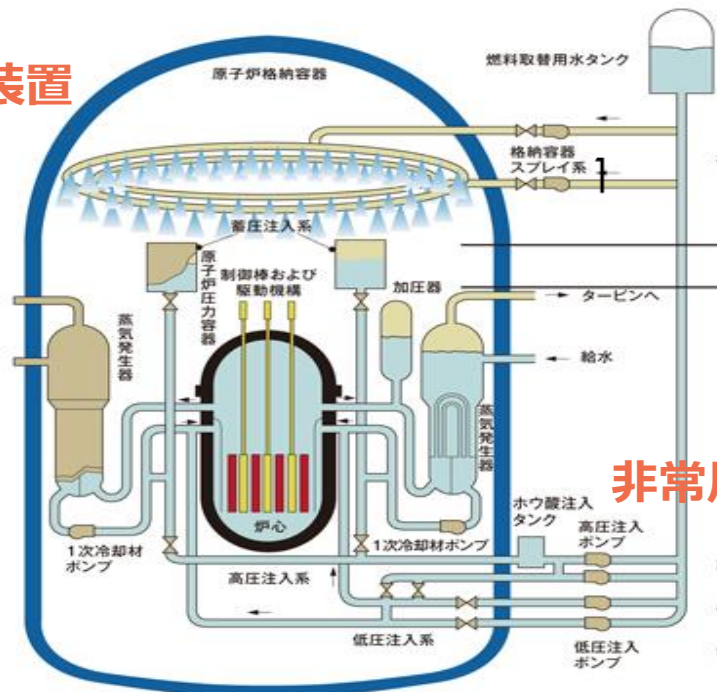
- 第1段階：安全確保のため、異常の発生を防止する。
 - ・安全上余裕のある設計（耐震設計など）
 - ・誤操作や誤動作を防止する設計（フェイルセーフ、インターロック）
 - ・自然災害に対処できる設計
- 第2段階：万一異常が発生しても事故への拡大を防止する。
 - ・異常を早く発見できる設計（監視計器）
 - ・原子炉を緊急に停止できる設計（緊急炉心停止回路）
- 第3段階：万一事故が発生しても放射性物質の異常な放出を防止する。
 - ・原子炉格納容器やECCS（緊急炉心冷却装置）が備えられている。[\(参考図\)](#)

<出典：ATOMICA他>

(4)安全機能有する設備は多重性を有する

非常用炉心冷却装置等の例 (PWR)

スプレイ装置



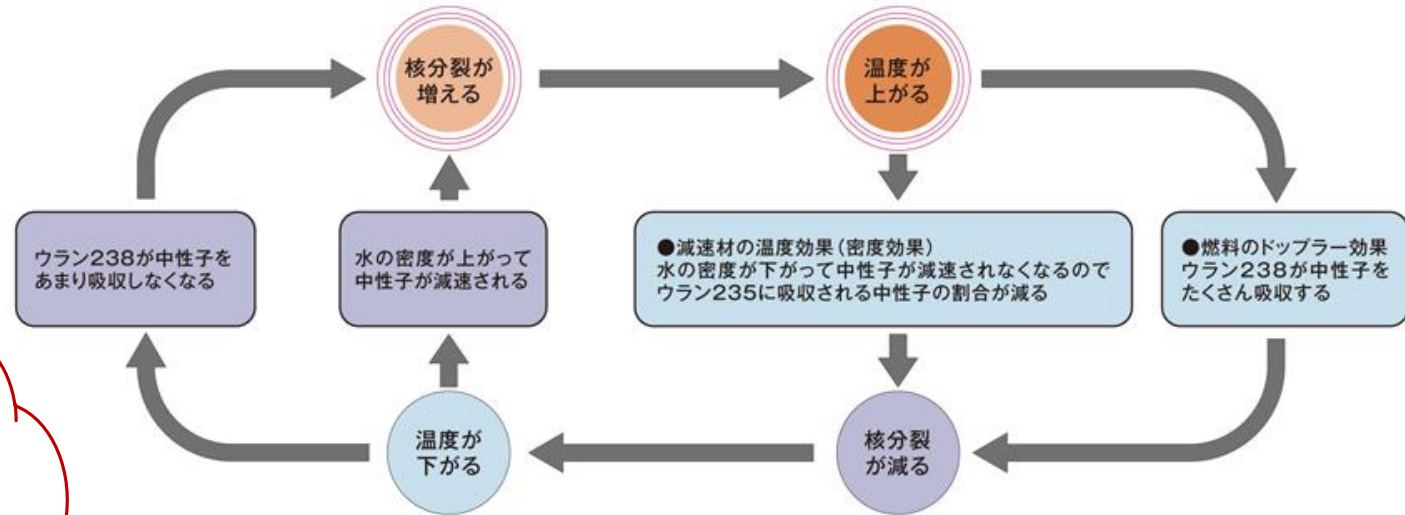
格納容器スプレイ装置
格納容器内の圧力が上昇した場合、格納容器内へ水をスプレイし内部の圧力の上昇を抑制

非常用炉心冷却装置
圧力容器内部の状況に応じ、それぞれの系統を用い炉心に水を注入する

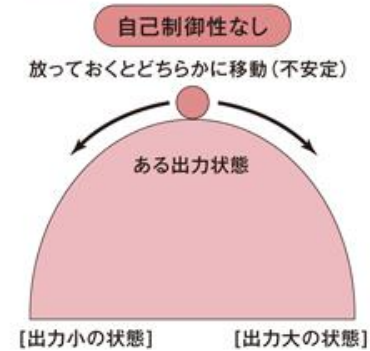
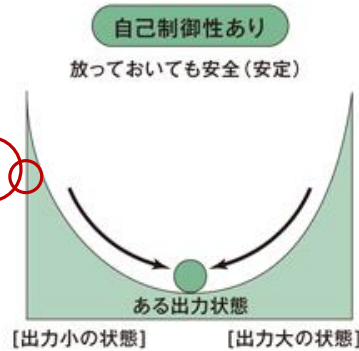
非常用炉心冷却装置

(4) の関連

原子炉の固有の安全性(自己制御性)



放っておいても出力は安定しており、自己制御性がある。

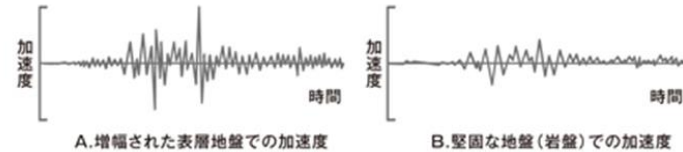


5-2-1

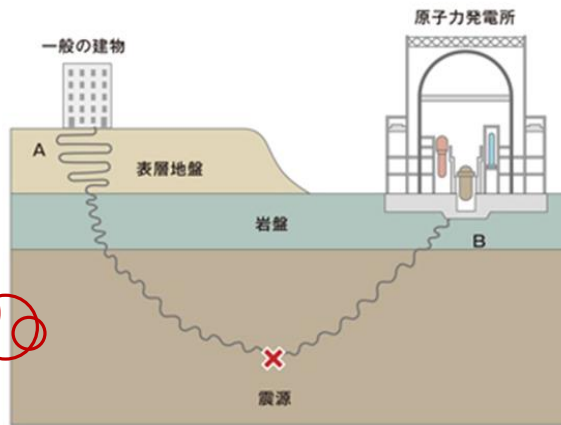
(4) の関連

原子力発電所と一般建築物の揺れの差

堅固な地盤(岩盤)上に設置した原子力発電所と一般の建物の揺れの伝わり方



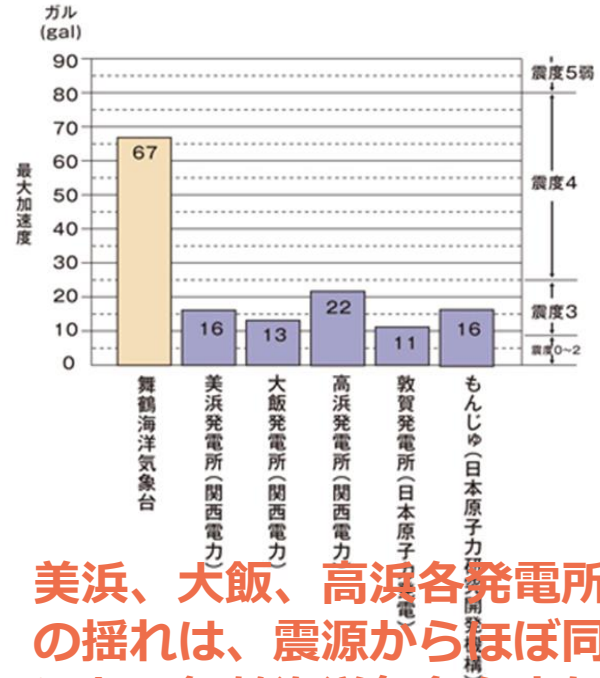
(注)地震波形は模式図



堅固な地盤(岩盤)での揺れは表層地盤に比べ1/2~1/3程度

堅固な地盤(岩盤)での揺れは表層地盤に比べ一般に1/2~1/3程度の少なさである。

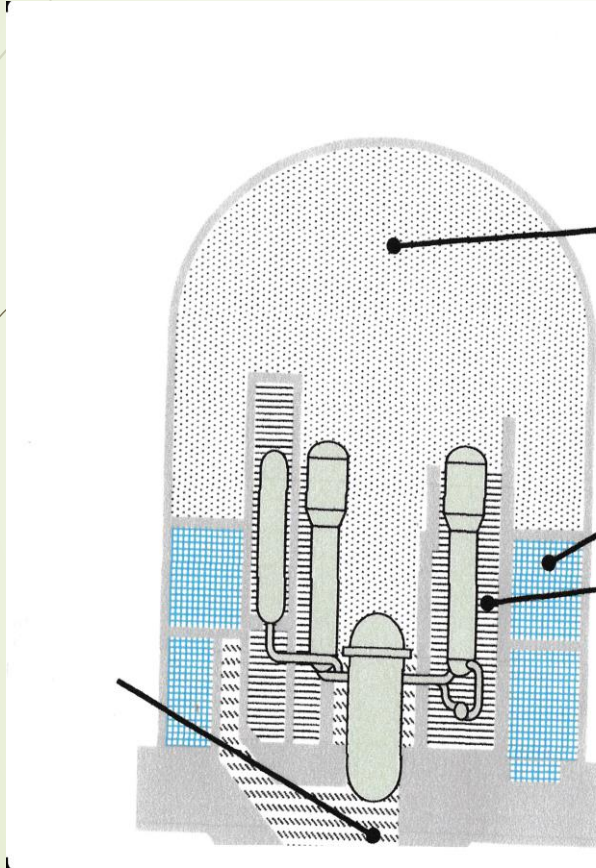
1995年兵庫県南部地震による若狭湾周辺の最大加速度観測値



美浜、大飯、高浜各発電所の実際の揺れは、震源からほぼ同じ遠さにある舞鶴海洋気象台より1/3~1/5の少なさであった。

出典：旧原子力安全・保安院「新しい耐震設計審査指針」、資源エネルギー庁パンフレットより作成

(5) 安全解析による確認



左図は、格納容器内温度圧力過渡解析のためのMAAP解析モデルのポンチ絵である。

他の事故事象も別の解析コード、解析モデルで、事故状態下での温度、圧力、流量、水素濃度等の時々刻々の変化（過渡変化）が計算される。

解析による確認は、実験データによる検証やこれまでの解析実績を踏まえ、精度の高い結果が得られている。

TMI事故時に日本でも多くの事故解析がなされ、解析結果により、日本のPWRの安全性が証明されたと言える。

余談：機能試験、改造工事での現場の印象

1) 建設時の機能試験のとき

- ・最盛期には1プラントあたり3,000人を超えるに人数に。
- ・ヘルメットの色や模様で識別。名前や血液型まで書いたものも。
- ・毎朝の朝礼。毎回交代で講話が。
- ・仕出し弁当と売店
- ・夏場は炉容器周りなど、かなり暑い。

2) 定検中の改造工事のとき

- ・工程順守のプレッシャー。
- ・原子炉容器は厚いコンクリート壁で遮へいされているので、すぐ外側のループ室でも放射線レベルは余り高くない。
- ・起動時、系統温度上昇に伴い、熱ノビによる配管の変位大。

3. 世界の原子力発電所の事故事例と教訓

- (1) 米国スリーマイルアイランド原子力発電所事故
- (2) ソ連チェルノブイリ原子力発電所事故
- (3) 東電福島第一原子力発電所事故
- (4) 事故事例を踏まえた今後の対応

(1)

スリーマイルアイランド原子力発電所事故の概要

○事故の主な経緯

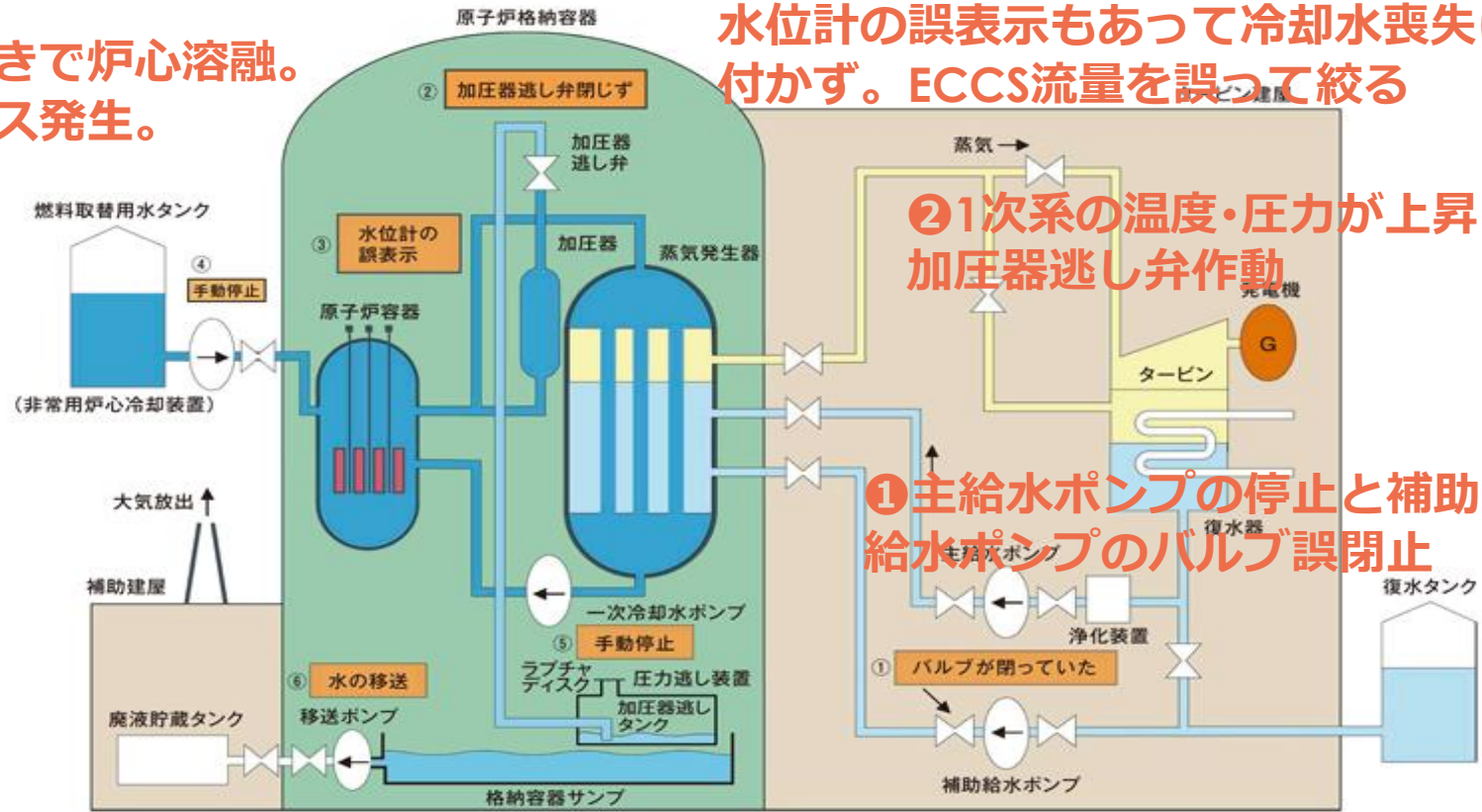
1979年3月28日、アメリカのペンシルバニア州スリーマイルアイランド(TMI)原子力発電所2号機で主給水ポンプが停止。補助給水ポンプが自動起動したものの、ポンプ出口弁全閉で二次冷却水循環水が循環せず、また、自動起動した非常用炉心冷却装置(ECCS)を運転員が誤判断し、手動で停止した等、機器の故障や誤操作の結果、炉内構造物が一部溶解した。

○環境への影響

周辺の公衆が受けた放射線の量は最大で1ミリシーベルト、平均0.01ミリシーベルトと健康に害を及ぼすほどの放射線はなかった。

④炉心の空焚きで炉心溶融。
大量の水素ガス発生。

③逃し弁開固着で冷却水漏れっぱなし。
水位計の誤表示もあって冷却水喪失に気付かず。ECCS流量を誤って絞る



5-5-1

米国スリーマイルアイランド(TMI)原子力発電所事故概要

- ①発生日：1979年3月28日（現地時間）
- ②場所：米国ペンシルバニア州（ワシントンD.Cの北北西約160 km）サスケハナ川の中州
- ③事故経過：
 - ・弁誤閉止によりSGへの給水が止まって1次系の温度が上昇し、加圧器逃し弁から1次冷却水が流出し始めた。
 - ・加圧器逃し弁が開固着したため、1次冷却水の流出が止まらなかった。ECCS自動起動したが、運転員が満水と誤認して流量を絞った。そのため炉心の2/3が露出し、炉心が溶融した。
 - ・ジルコニウム水反応により大量の水素ガスが発生し、放射性物質が環境に放出された。
- ④環境影響：放射性希ガス 約 1×10^{17} Bq、ヨウ素131 約 6×10^{11} Bqが放出された。周辺公衆の被ばく線量は最大でも1 mSv以下。健康に与えた影響は殆ど無視できる程度だった。
- ⑤事故原因：安全系の補助給水系の弁の誤閉止やECCE誤停止等のヒューマンエラー、加圧器逃し弁の開固着、加圧器水位計の誤指示
- ⑥教訓：「我が国の安全確保対策に反映させるべき事項(52項目)」として、基準審査関係（安全設計審査指針など）、設計関係（1次冷却材の状態の監視方式など）など52項目が挙げられ反映された。

[出典：ATOMICA]

(2)

チェルノブイリ原子力発電所の構造

(黒鉛減速軽水冷却沸騰水型炉RBMK)

④ 格納容器がなく、火災、爆発で多量の放射性物質が大気中に放散

制御室:安全系を切るスイッチがある

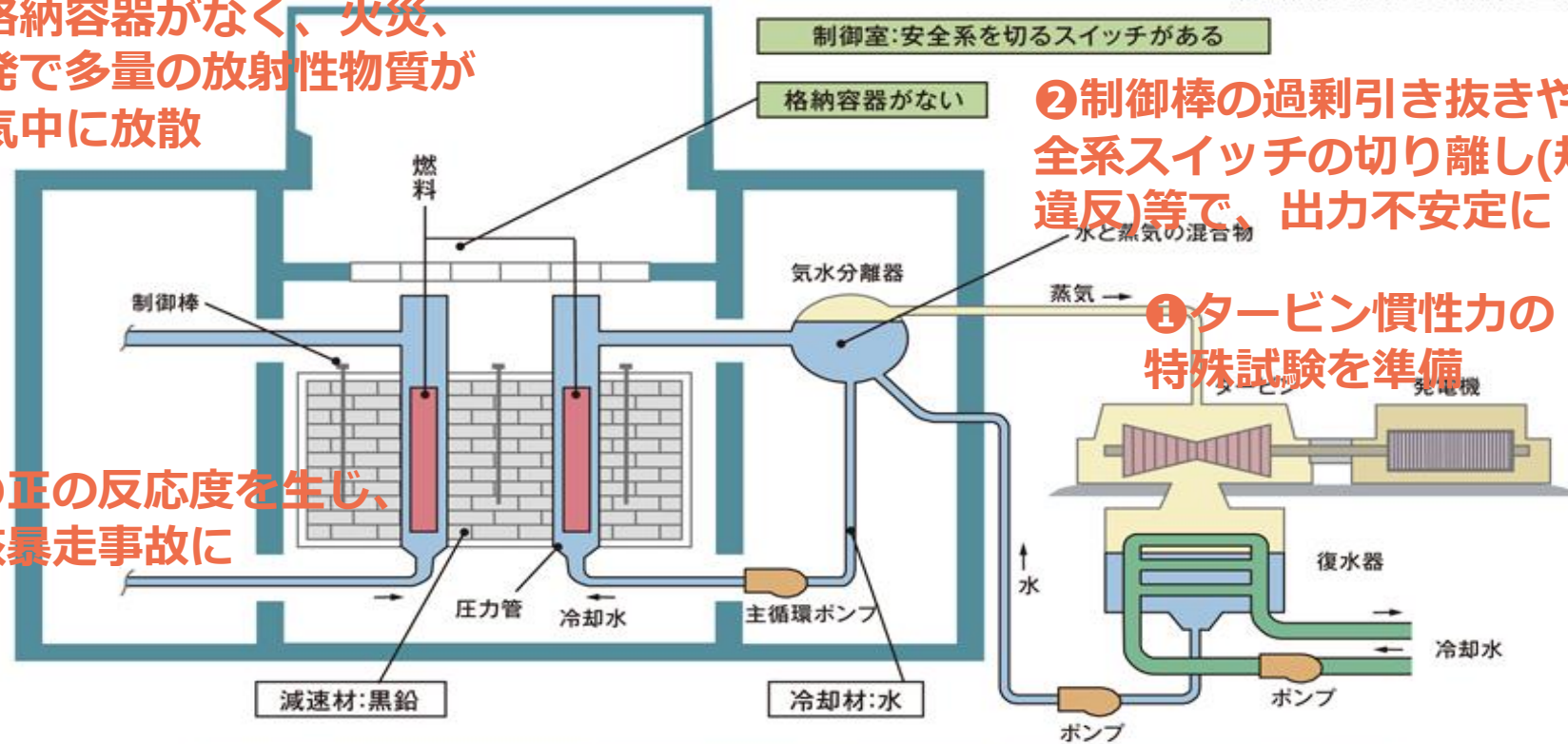
格納容器がない

② 制御棒の過剰引き抜きや安全系スイッチの切り離し(規則違反)等で、出力不安定に

水と蒸気の混合物

① タービン慣性力の特殊試験を準備

③ 正の反応度を生じ、核暴走事故に



自己制御性	日本の原子炉	チェルノブイリの原子炉
冷却材	あり	なくなる場合がある
中性子の減速材	水	水
安全装置	インターロックにより危険操作の防止	容易に外せる
原子炉をカバーする丈夫な格納容器	あり	なし

5-4-1

ソ連チェルノブイリ原子力発電所事故概要

①発生日：1986年4月26日

②場所：キエフ市の北北西約100 km、プリピャチ川の川岸

③事故経過：

- ・タービン慣性エネルギー利用に関する特性試験の準備中に原子炉熱出力を下げすぎたため、出力回復の目的で、制御棒の過剰引き抜き、原子炉保護信号の切り離し等の違反操作を行なった。
- ・試験を開始し、流量低下とともに炉心のボイド増加・原子炉出力上昇を始め、出力暴走事故を招いた。
- ・火災、爆発が起こり、炉心のウランやプルトニウムと共に、多量・多種の放射性物質が大気中に放出され、ヨーロッパ等に拡散して多くの国にまたがる広範囲の重篤な放射能汚染を起こした。

④環境影響：

- ・希ガス 2×10^{18} Bq、ヨウ素131 1×10^{18} Bq
- ・急性放射線が原因の死亡 47人
- ・一般人の被曝 50mSv以上27万人、33mSv以上11万6千人

⑤事故原因：不適切な手順で規則に反した試験を実施したこと、および、安全保護回路を不正に切り離したこと。

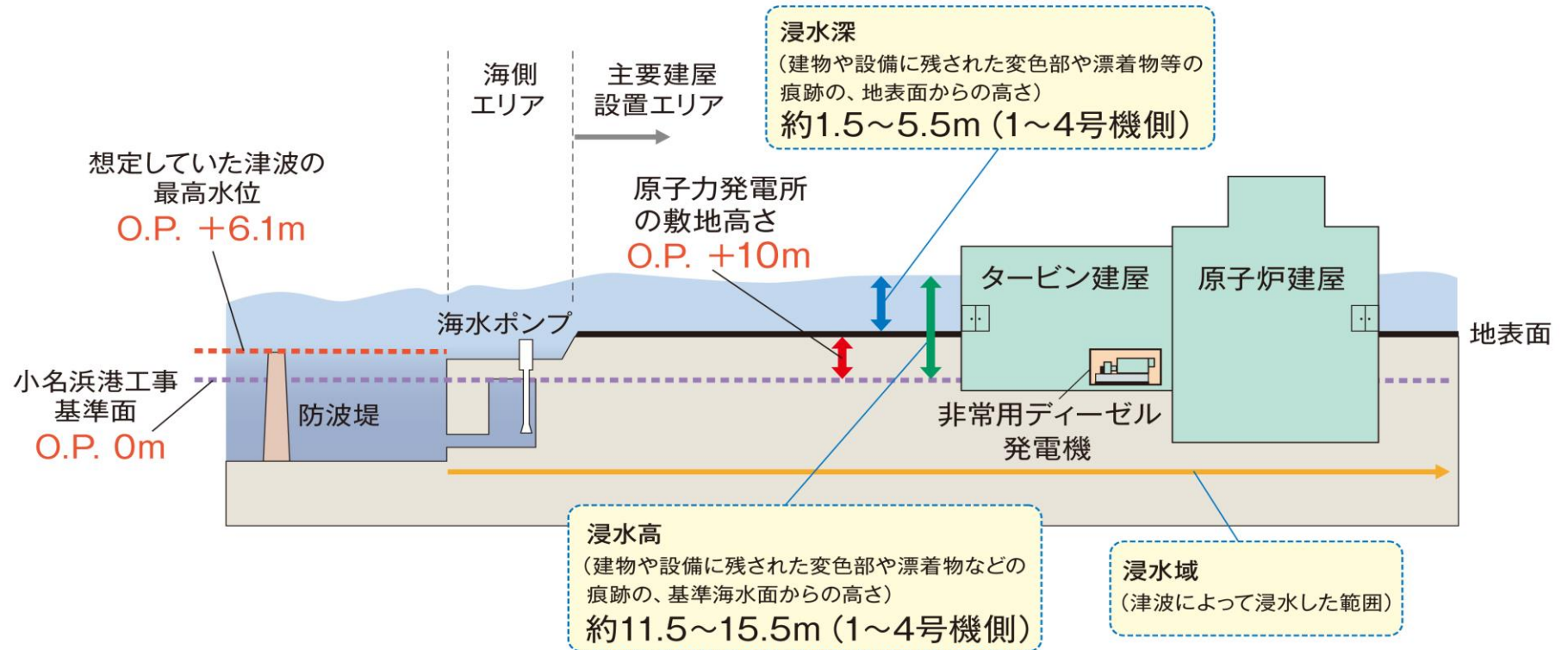
炉心出力特性も低出力域で正の反応度を有する不安定な原子炉であったこと。（PWR,BWRは固有の安全性がある。）

格納容器がなく、広範囲、高レベルの放射能汚染を招いたこと。（他の国の発電用原子炉は格納容器を有する。）

⑥教訓：事故の再発防止策として、制御棒引き抜き上限の設定、反応度操作余裕の増加、運転員訓練の強化と管理制度の改善などを行なった。 [出典：ATOMICA他]

(3)

福島第一原子力発電所に到達した津波の大きさと浸水状況



10-2-3

出典：原子力安全・保安院資料より作成

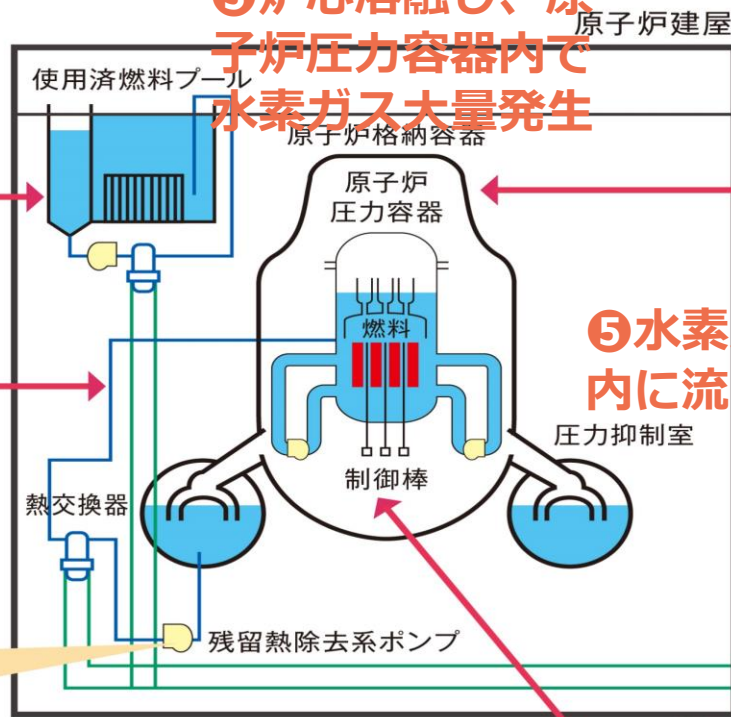
福島第一原子力発電所の事故概要

②地震後の津波襲来により電源全喪失し、安全系冷却ポンプ等が作動できず、冷却機能喪失した

冷やす ✕
原子炉水や使用済燃料プール水の温度を下げ、低温に維持する

原子炉や使用済燃料プールを冷却するためのポンプの電源が喪失したことにより、「冷やす」機能を喪失

③炉心溶融し、原子炉压力容器内で水素ガス大量発生



④格納容器の閉じ込め機能不十分

閉じ込める ✕
放射性物質が外部に出ないようにする
⑤水素ガスが原子炉建屋内に流出し、水素爆発
燃料の損傷、水素爆発による原子炉建屋破損など、「閉じ込める」機能を喪失

①地震発生に伴い即座に原子炉停止した

止める ⊖
核分裂反応を起こす中性子の働きを抑制するための制御棒をすべて挿入して、原子炉を停止させる

東電福島第一原子力発電所事故概要

①発生日：2011年3月11日

②場所：福島県福島第一原子力発電所

③事故経過：

- ・東北太平洋沖の巨大地震で原子炉が自動停止した後、襲来した巨大津波によって電源設備が壊滅的な打撃を受け、全電源喪失となり、冷却機能の喪失を招いた。また、直流電源も喪失し、監視手段がなくなった。
- ・手探り状態で回復操作を試みたが、炉心で発生した水素が格納容器から外に漏れ、原子炉建屋内で水素爆発を生じ、建屋が損壊した。**(現在の残留燃料の発熱量は極小)**

④環境影響：セシウム 約 1×10^{19} Bq、ヨウ素131 約 2×10^{17} Bq

チェルノブイリ事故に比べて、希ガス放出量は約2倍だが、セシウムやヨウ素131の放出量はおおよそ1/5の少なさである。

一般人の被ばく量は、最高約23mSv程度に収まっている。

⑤事故原因：巨大津波による全電源系の機能喪失が主な原因である。

⑥教訓：シビアアクシデント対策の義務化等を含む新規制基準の策定

[出典：ATOMICA他]

クイズ（その2）

福島第一事故から7年以上経つが、現在原子炉に残っているウラン燃料の崩壊熱量はどれくらいか？ 燃焼停止直後の発熱量に比べてどの程度下がっているのか？

次の3つの中から選んでください。

- (A) 1/10 以上残っている
- (B) 1/100 程度
- (C) 1/1000 より少ない

解答（その2）

正解：(C) 1/1000 より少ない

燃焼停止直後のFP崩壊熱は、運転時出力の6.5%程度であり、発熱が燃焼停止直後の1/10になるのは8時間後、1/100になるのは4ヶ月後、1/1000になるのは3年後とされている。ただし、Puの生成・燃焼の効果やMA崩壊熱は考慮せず、U235のみを一定出力で2年間運転継続した場合のFP崩壊熱とする。（以上、日本原子力学会誌2011年8月号、東京都市大学 吉田正氏）

1号機熱出力138万kWに対して、0.065と1/1000を掛け合わせると、現在の1号機の発生熱量は90kW以下となる。夏場の室内温水プール（50m×25m）の放熱量でさえもおよそ200kWあると言われており、90kWの熱量は、夏場でも温水プールの水温を維持できないほどの少ない熱量と言える。

(4) 事件事例を踏まえた今後の対応

- ・ TMI事故は、ヒューマンエラーや計器・弁の不具合等が主な事故原因であり、運転員・作業員の教育や機器の設計見直し等で改善が進む。
- ・ チェルノブイリ事故は、固有の安全性に欠けた原子炉で不正操作を伴う特殊な試験が行なわれ、核暴走事故を引き起こした。また、格納容器がないため、ヨーロッパ各国を含む広い地域が重金属を含む多量の放射能で汚染した。健康影響の懸念が今後も続くと言想される。
チェルノブイリ発電所は他の号機も既に廃止され、今後は肅々と廃炉措置が続くと思われる。
- ・ 福島第一事故は、これらとは異なり、巨大津波という自然災害の想定が不十分であったことによるものである。より厳しい新規制基準を制定し、運用することにより、過酷事故の再発は防げるものと考えられる。
チェルノブイリと異なり、放射線の被ばくによる直接の死者は一人もでていない。放射能汚染状況も、ほぼセシウムだけが残留した状態にあり、今後の減衰が期待できる。

4. 原子力発電の必要性

- (1) 日本の「アキレス腱」：エネルギー自給率は僅か8%
- (2) 近い将来の火力発電の衰退
- (3) 再生可能エネルギーはクリーンだが安定電源ではない
- (4) 原子力発電は資源小国日本の将来にとって必要不可欠

(1) 日本の「アキレス腱」：エネルギー自給率は僅か8%

- ・世界的にエネルギー需要が急増し、資源の奪い合い。
- ・石油は政情不安定な中東地域に偏在、いつでも供給ストップの怖れがある。第一次石油危機後、日本は約半年分の石油備蓄を持つようになったが、それでも盤石ではない。
- ・天然ガスは長期備蓄が利かず、2週間分程度の備蓄しかない。
- ・中東からの石油は、
ペルシャ湾、ホルムズ海峡、インド洋、マラッカ海峡、南シナ海
を經由し、日本まで約13,000キロもの長いシーレーンを大型タンカーで、1日平均3隻の割合で運搬している。
途中で多数のチョークポイント（テロや海賊が出没する難所）があり、油断できない。

(2) 近い将来の火力発電の衰退

- ・ 既存の油田の多くはピークを過ぎ、今後の供給不足が予測されている。
- ・ 温暖化対策上化石燃料は益々使いにくくなる。特に石炭は安価で埋蔵量も豊富だが、使い難い。欧米各国は厳しい排出規制があり、石炭火力発電所の建設が益々困難に。
- ・ 日本は福島事故後、原発の穴埋めにやむを得ず、一旦リタイアした老朽火力発電所をフル稼働させて電力需要を賄っているが、その弊害が現れた。

(3) 再生可能エネルギーはクリーンだが安定電源ではない

- ・ 太陽光や風力発電は身近な発電方法で馴染みやすいが、元々、天候、日照時間や風況などに左右され、安定性を欠く。
- ・ 現状、バックアップ電源として火力発電を必要としており、太陽光や風力には「基幹電源」となるだけの実力が無い。
- ・ 蓄電設備により不安定さを補う場合は、大幅なコストアップを招く。

(4) 原子力発電は資源小国日本の将来にとって必要不可欠

- ・ 安定電源でありエネルギー安全保障にプラスとなる。
- ・ エネルギー密度が高く、**長く安定したエネルギーが取り出せる。**
- ・ CO2発生量が少なく、温暖化防止に有効である。
- ・ 原子力エネルギーの平和利用には高度な科学技術が必要であり、技術立国の日本にとって最適な技術と言える。

クイズ（その3）

“長く安定したエネルギーが取り出せる”のはクイズ（その1）にもあったように、長く核分裂反応を続けられるためだが、PWRの燃料ペレット1つあたり、一般家庭の使用電力量の何ヶ月分をまかなうことが出来るか？

次の3つの中から選んでください。

なお、ペレット重量 5.48g/個、平均燃焼度 44000MWD/T、一般家庭の1ヶ月平均消費電力量 264kWh とする。

(A) 1ヶ月分 (B) 3ヶ月分 (C) 8ヶ月分

解答 (その3)

正解 : (C) 8ヶ月分

$$\begin{aligned} \text{発熱量} &: 5.48 \text{ g} \times 44000 \text{ MWD/T} (44 \text{ kW/g}) \times 24 \text{ h/D} \\ &= 5787 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{発電電力量} &: 5787 \text{ kWh} \times (1180 \text{ MWe}/3423 \text{ MWt}) \\ &= 1995 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow 1995/264 = 7.6 \approx 8 \text{ ヶ月}$$

5. 本日のまとめ

- ・福島第一事故は自然の猛威によって引き起こされた事故であり、米国やソ連のようなヒューマンエラーや規則違反等が主原因の事故とは異なる。士気の緩みはない。自然の脅威を厳しく予測し、適切に対処することで、過酷な事故を未然に防ぐことができる。
- ・原子力エネルギーは密度が高く、長く安定したエネルギーを取り出すことができる。
- ・原子力エネルギーの平和利用には高度な科学技術が必要であるが、技術立国の日本にとって、技術力を高めながら世界に貢献できる最適な技術である。