

考証 福島原子力事故

炉心溶融・水素爆発はどう起こったか

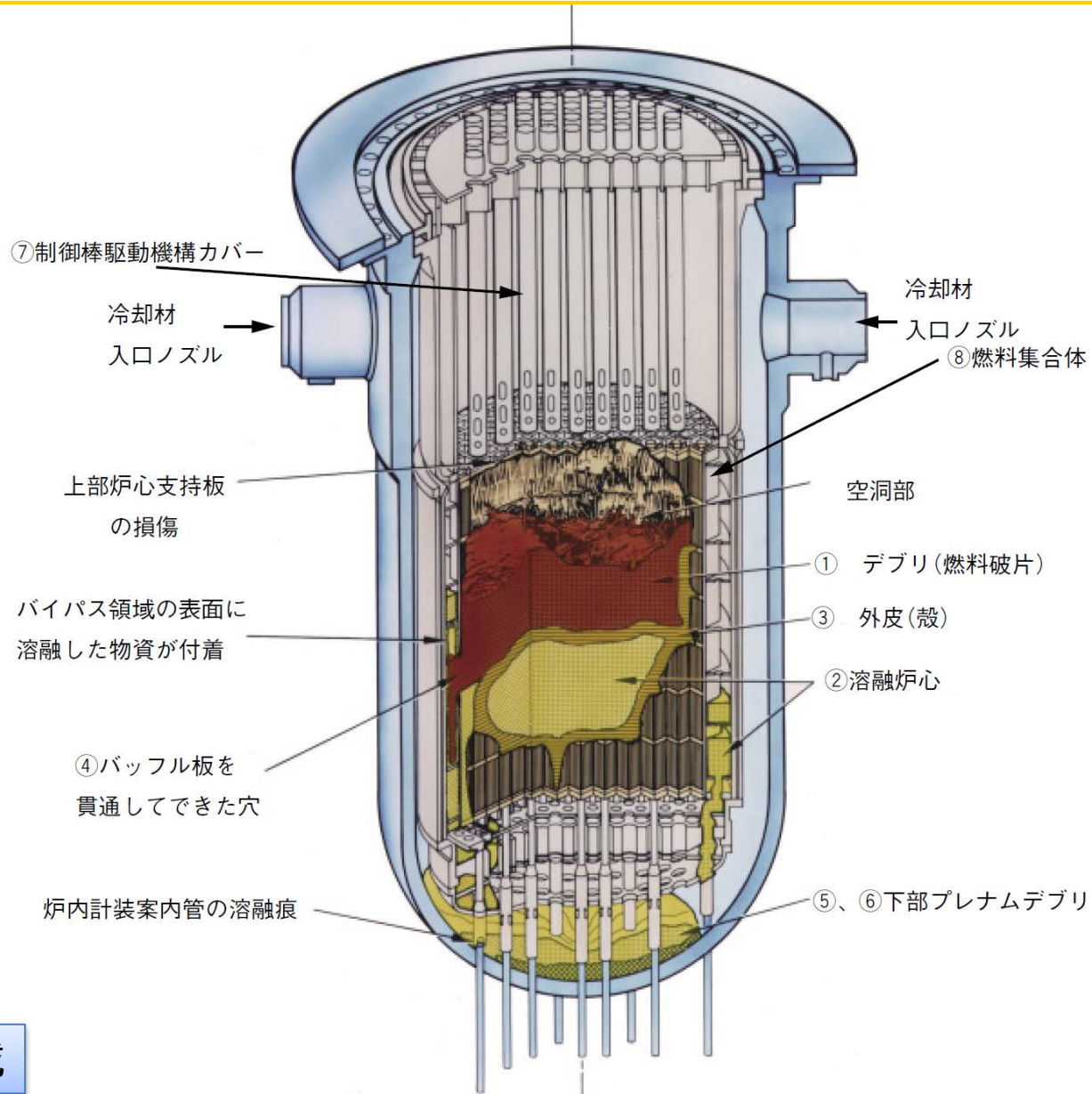
平成26年6月19日

石川 迪夫

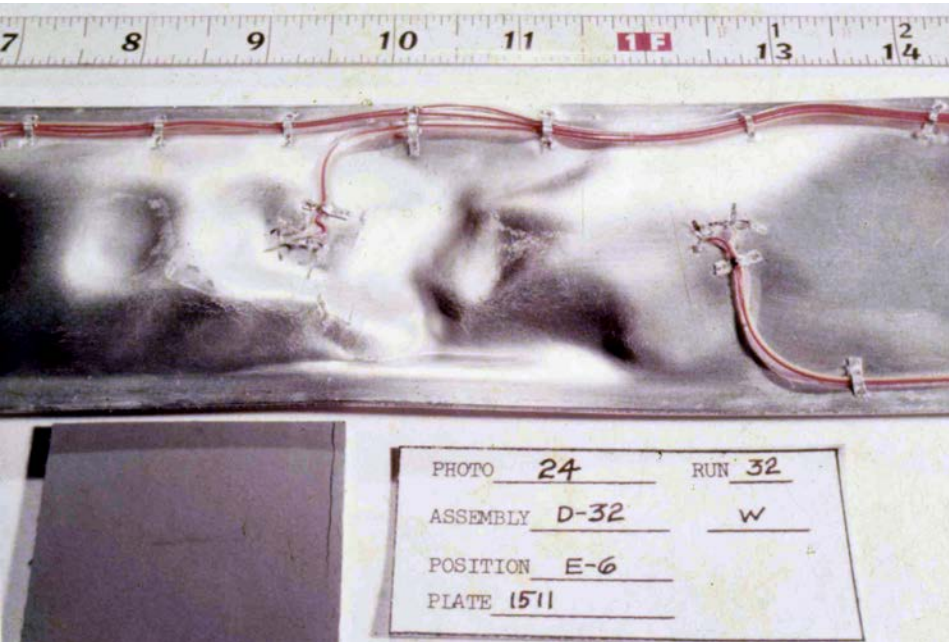
本日の説明順序

1. 過去の炉心溶融等の実験
2. TMI-2号機事故
3. 福島第一 2号機の事故
4. 福島第一 3号機の事故
5. 福島第一 1号機の事故
6. 放射能放出

事故後のTMI-2号機炉内状況

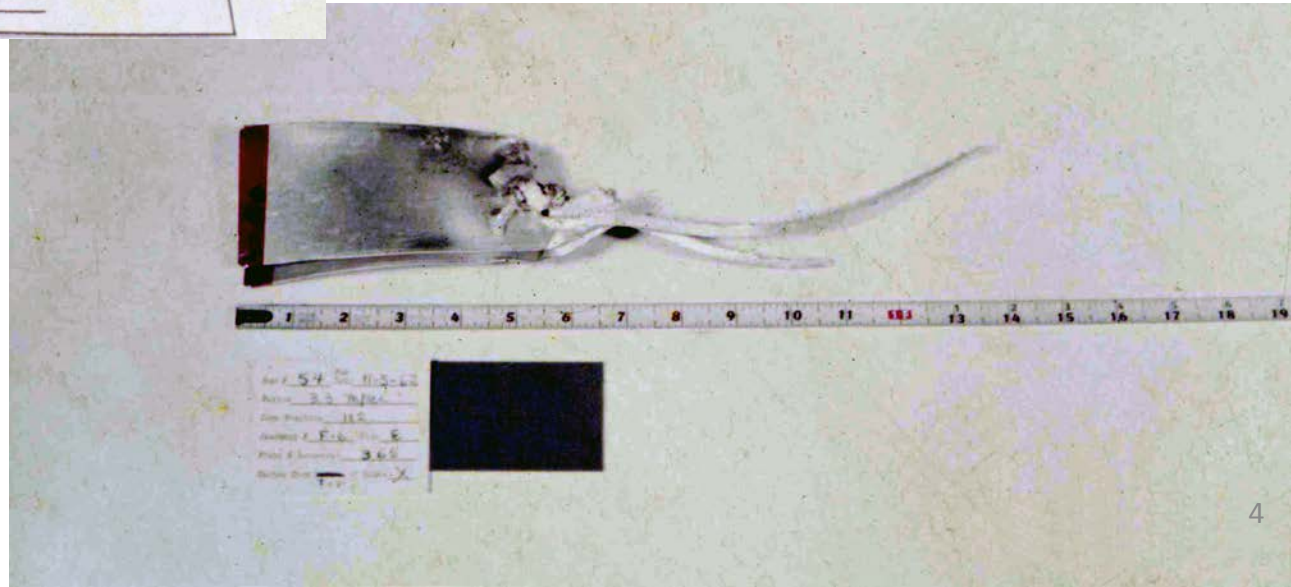


板状燃料の溶融実験(例示)



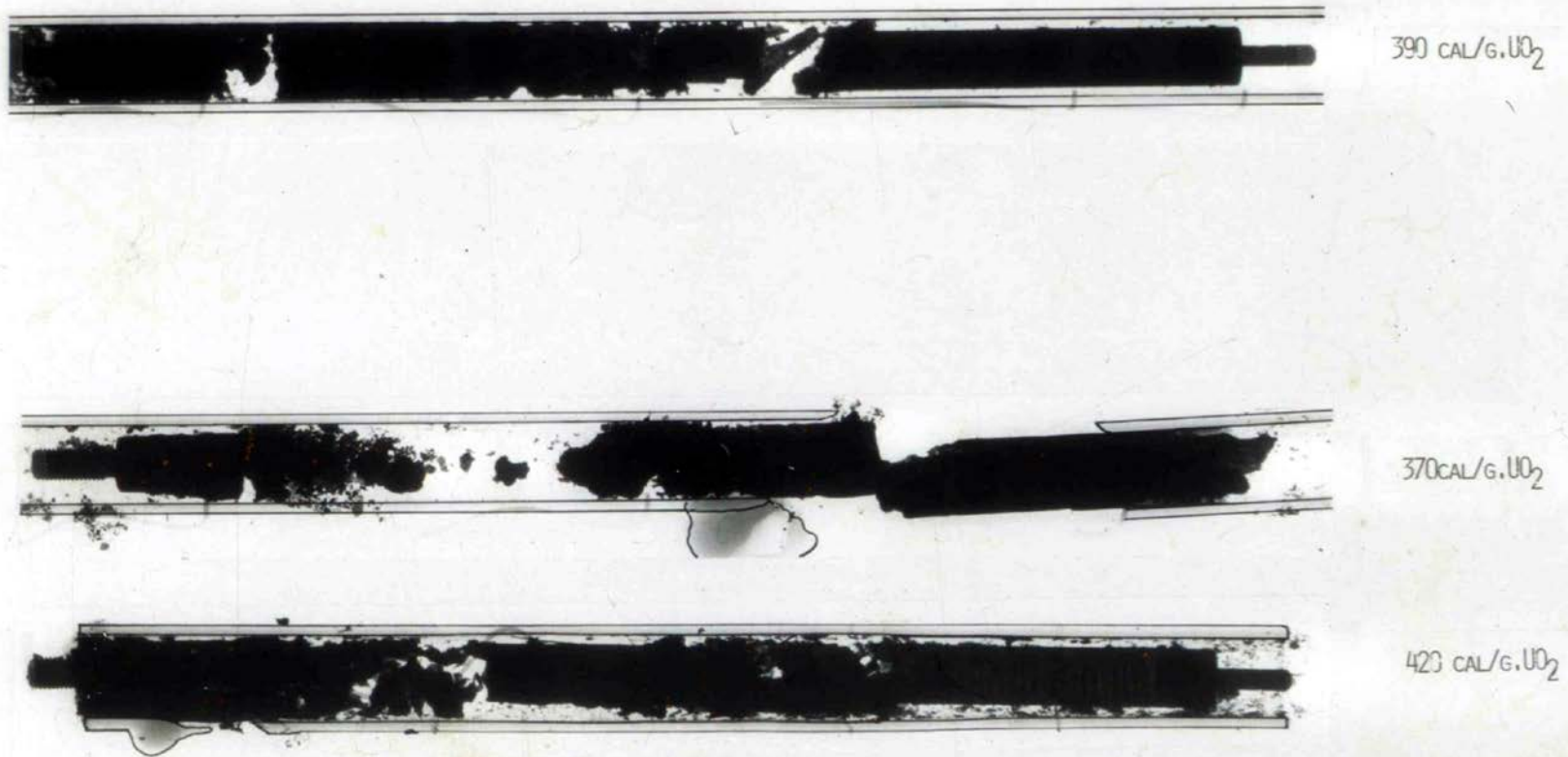
← 普通の燃料溶融

SPERT-1 破壊後燃料
↓



書籍 掲載なし

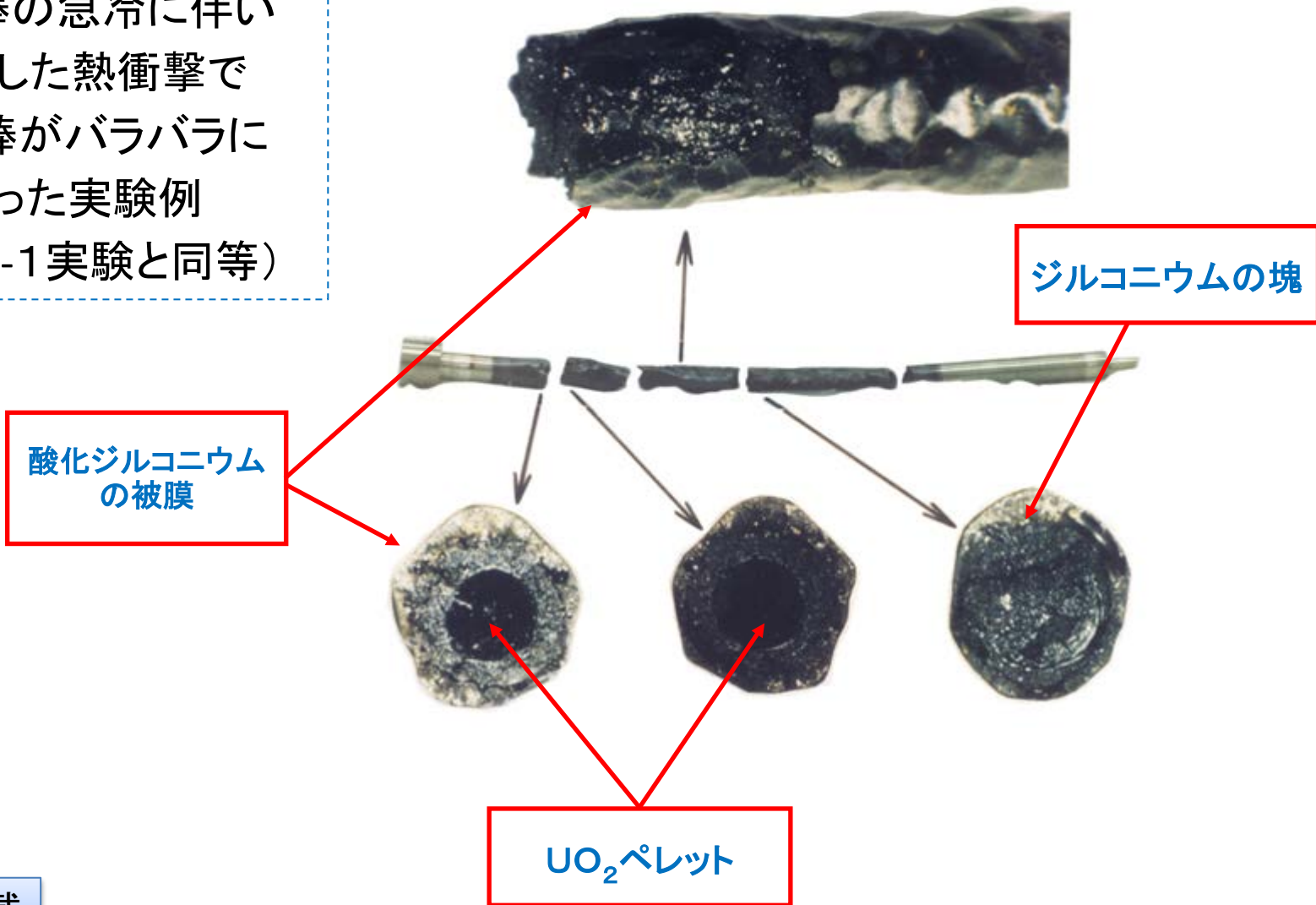
ジルカロイ被覆燃料の反応度投入事故の実験結果



Irradiated Test Fuel Rods with Flow Shroud

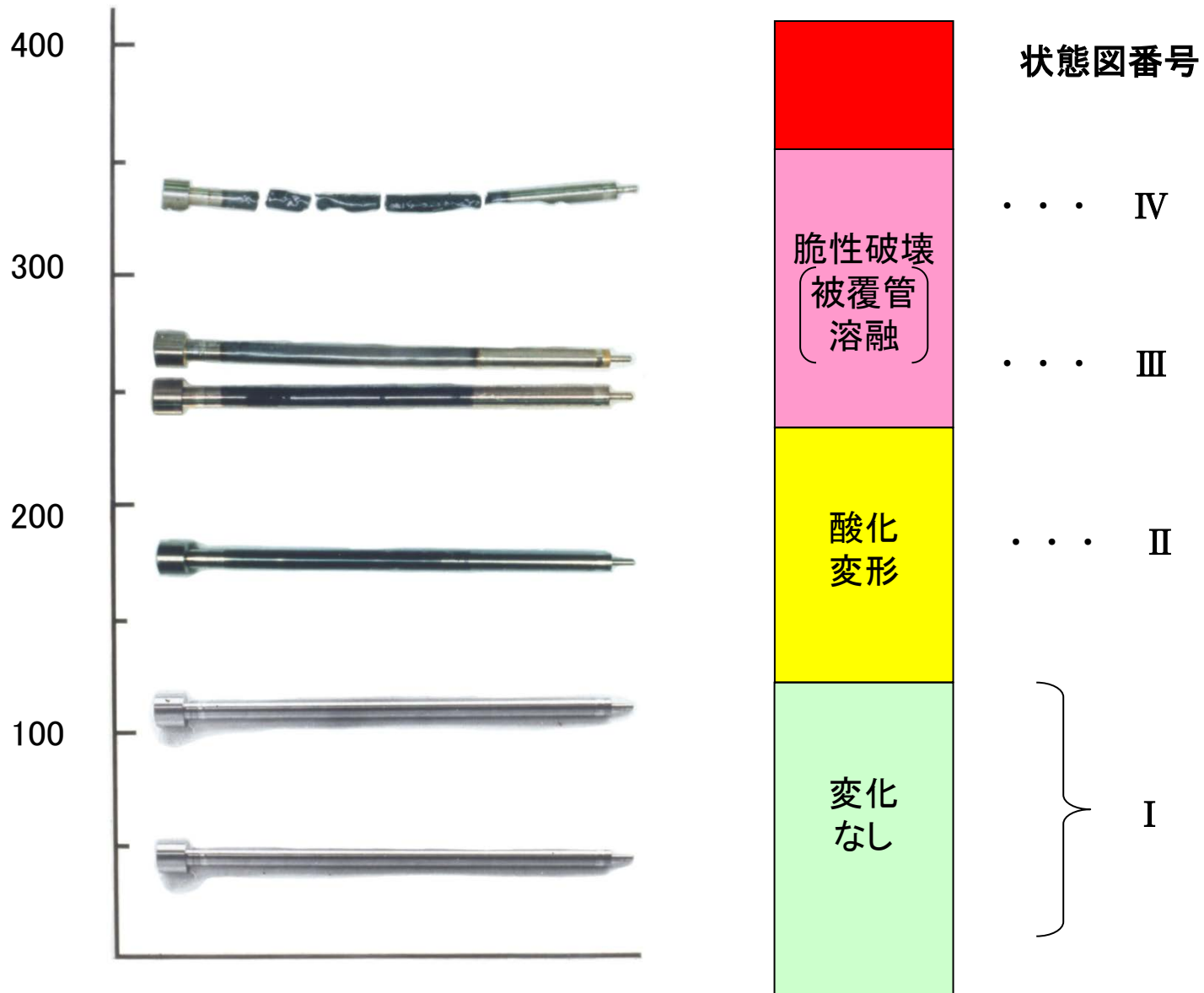
NSRR実験における燃料棒の酸化および分断状況図

燃料棒の急冷に伴い
発生した熱衝撃で
燃料棒がバラバラに
なった実験例
(PCM-1実験と同等)

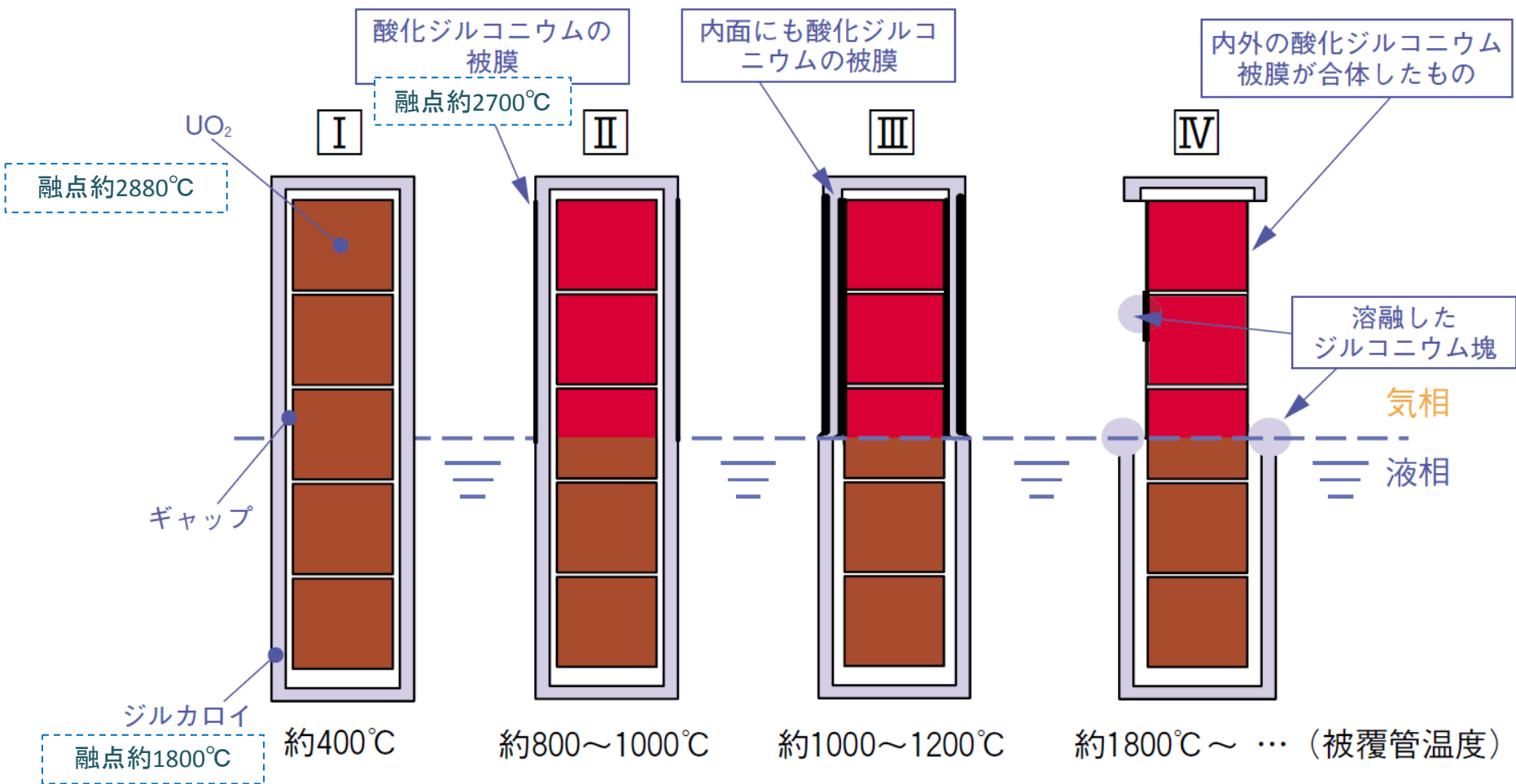


NSRR実験結果にみる燃料棒状態図

エネルギー添加量
(cal/UO₂)



事故時被覆管温度と燃料棒の状態図



TMI事故の経緯

TMI-2号機

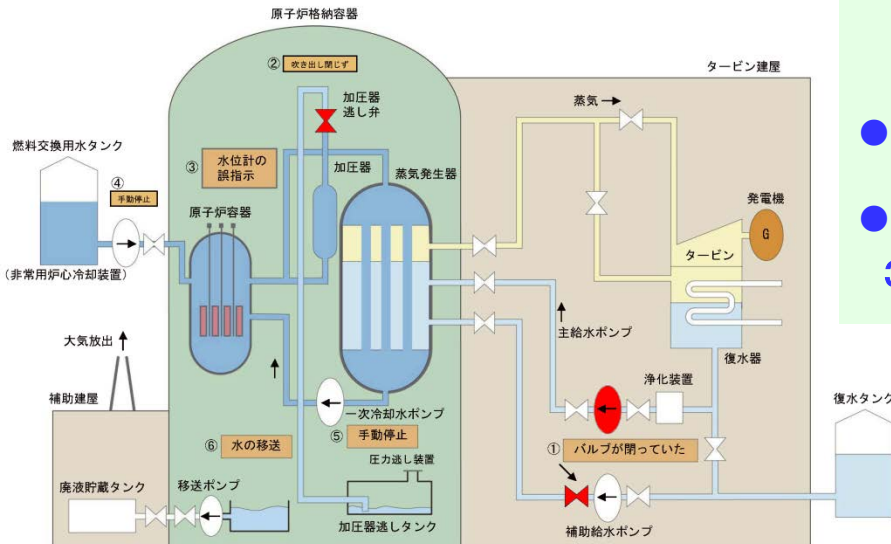
発生日: 1979年3月28日

出力: 95.9万kW

型式: バブコック&ウィルコックス社製PWR

(注) RCP: 一次冷却材ポンプ

ECCS: 非常用炉心冷却装置



● 事故拡大の要因(安全系の設備の停止)

- ・補助給水弁を閉じたまま運転
- ・非常用炉心冷却システムを手動停止 等

● 事故経過(3月28日)

- 04:00 事故発生(主給水ポンプ停止)
- 05:40 RCP停止(次々に、振動高により手動停止)
- 06:10頃 燃料上端より露出開始
- 06:22 加圧器逃がし弁の元弁閉止
- 06:54 RCP起動
 - 上部炉心の崩壊(冷水導入による急冷)
 - 炉心下部に溶融炉心形成
- 07:20 ECCS注入開始
- 07:44 溶融炉心より溶融した燃料が流出 → 冷却へ(固化)
- 14:00頃 水素爆発(換気装置ダンバー音と勘違い)

● NRCが事態認識

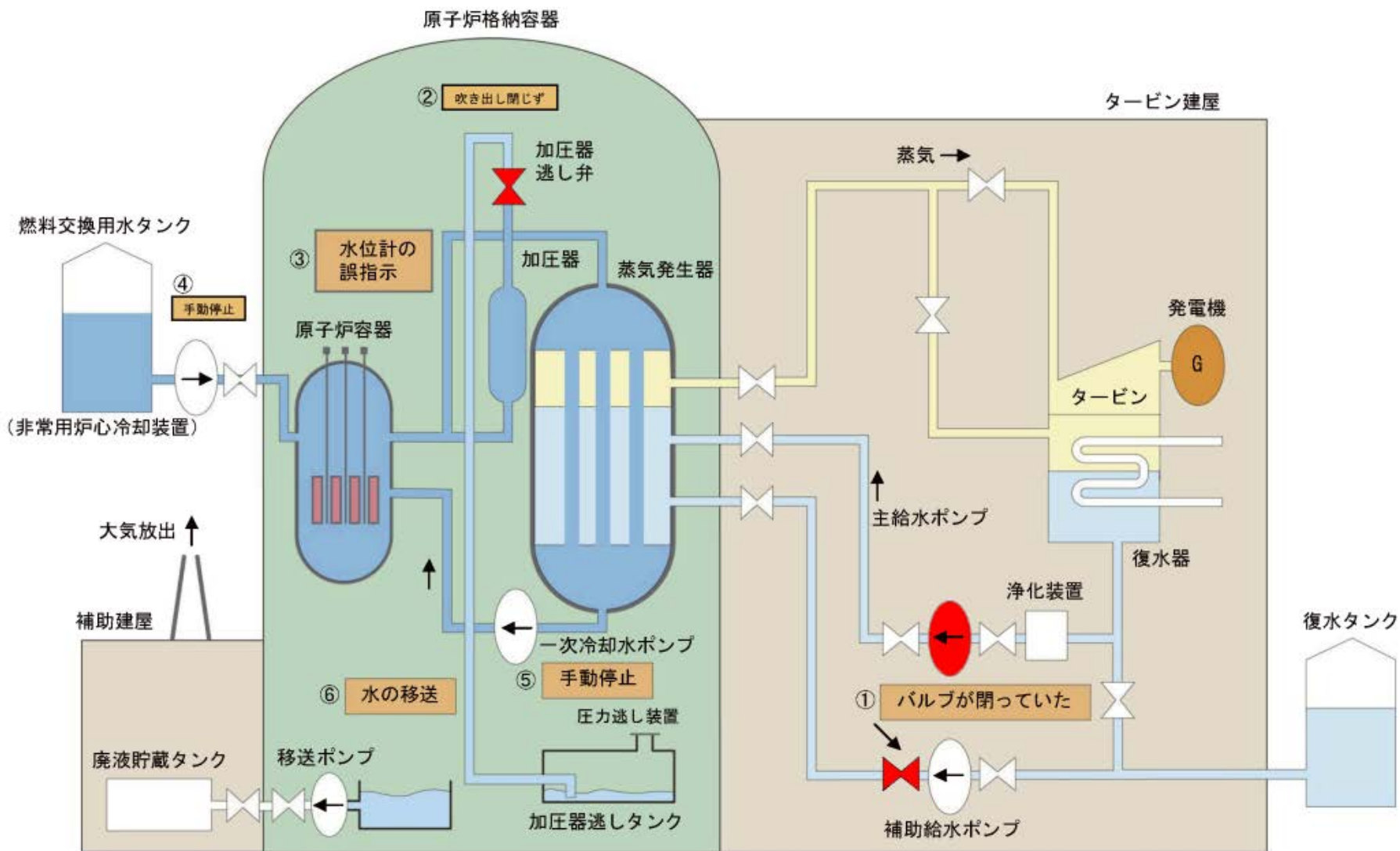
● 水素爆発後、水素爆発を心配し避難勧告

3月30日 昼頃 避難勧告(ペンシルベニア州知事)

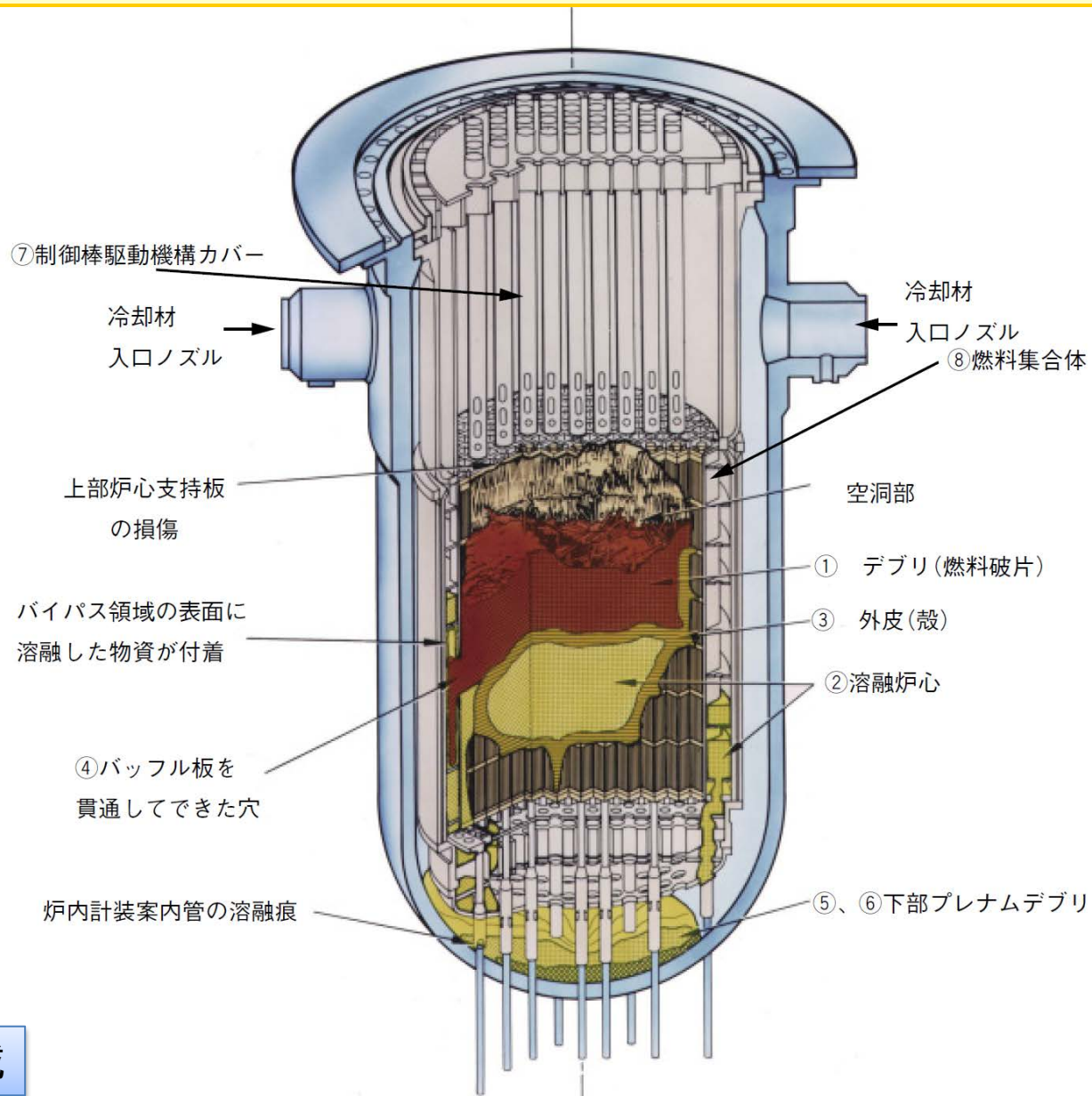
NRC Denton氏の現地入り

書籍 掲載なし

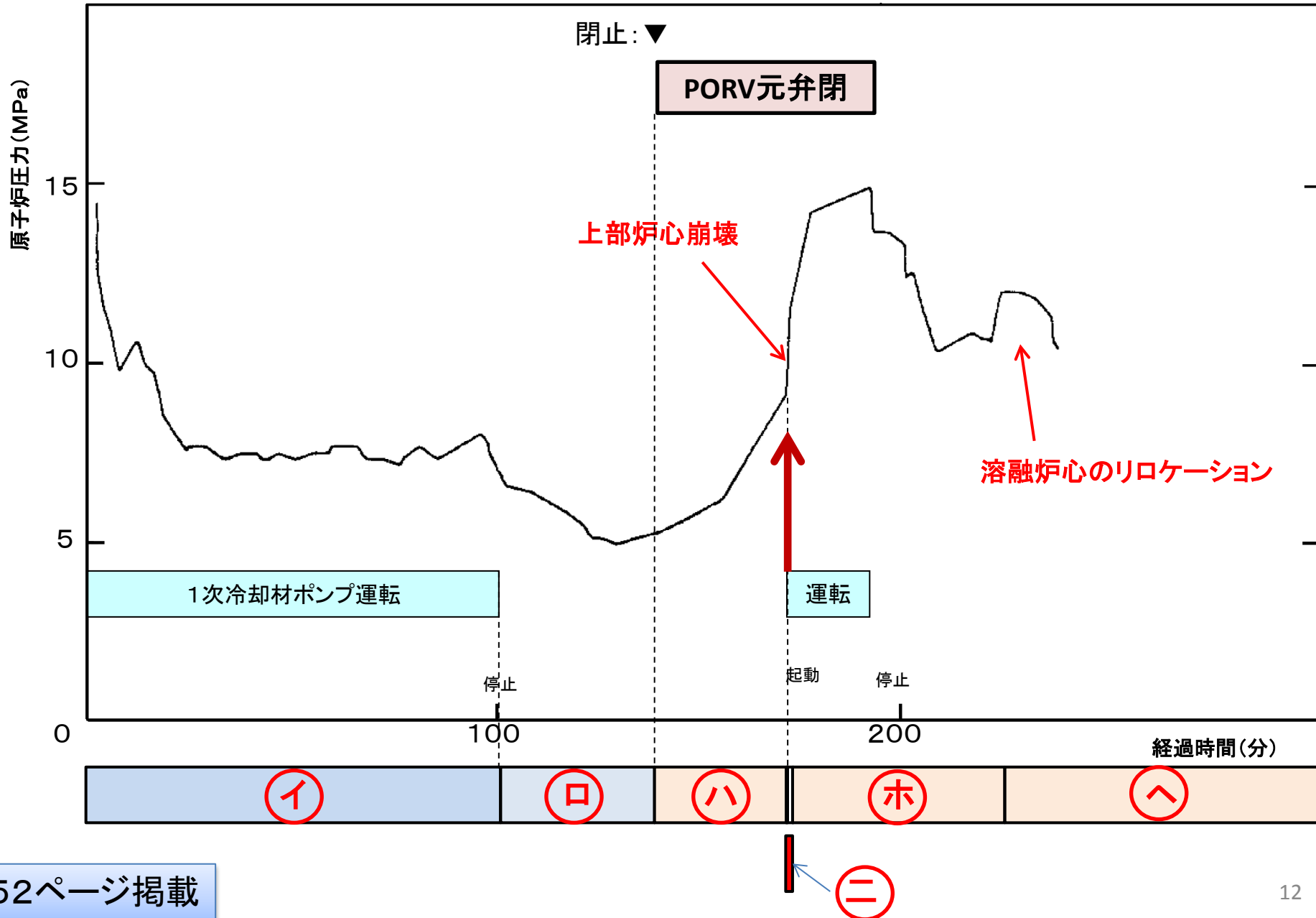
TMIの概略系統図



事故後のTMI-2号機炉内状況



TMI-2号機の原子炉圧力と事故シーケンス



(参考) 崩壊熱とZr-H₂O反応熱との比較

(崩壊熱量の評価)

TMI-2号機の定格熱出力は、2,770MWt

崩壊熱は、事故の1時間後に定格出力の約2%、1日後に約0.5%。
事故発生後、174分後の崩壊熱を定格出力の1%として、
174～176分の2分間の崩壊熱量は、以下のとおり。

$$2,770(\text{MWt}) \times 2 \times 60 = > \mathbf{3.3 \times 10^9 \text{joule}}$$

(Zr-H₂O反応による発熱量の評価)

TMI事故発生後、174～176分の2分間に、燃料被覆管の約25%に相当する量が反応し、**約4 × 10¹⁰joule**の発熱があったことを評価。

53～5ページ掲載

TMI事故では、Zr-H₂O反応による発熱量は、崩壊熱量の**約10倍**以上。

TMI-2号機事故のまとめ

1. 燃料温度が上昇し灼熱状態となった後、急冷に伴う熱衝撃により燃料棒はバラバラに分断して崩壊する。
2. 冷却材が十分に供給される場合、灼熱状態の燃料被覆管は水と反応し、炉心溶融を起こす。
3. Zr-H₂Oの反応により、大量の熱と水素ガスが発生する。
4. 溶融炉心と水とが接触しても、その表面には早期に強靱な殻が形成され、水と溶融炉心との直接接触は妨げられる。
5. 溶融炉心の組成は、ウラン、ジルコニウム、酸素の混合溶融物で、融点は約2,000～2,200℃であり、燃料ペレットの融点2,880℃よりも低い。

福島第一事故の経緯

3/11 事故原因 **地震** : **外電喪失(停電)** → **<原子炉>** 停止、冷却操作へ (順調な対処)
(人災ではない) 津波 : **非常電源喪失** → 自動制御不能、計測器停止、暗闇
 (電源設備被水)



約10日間



炉心溶融
水素爆発
放射能放出

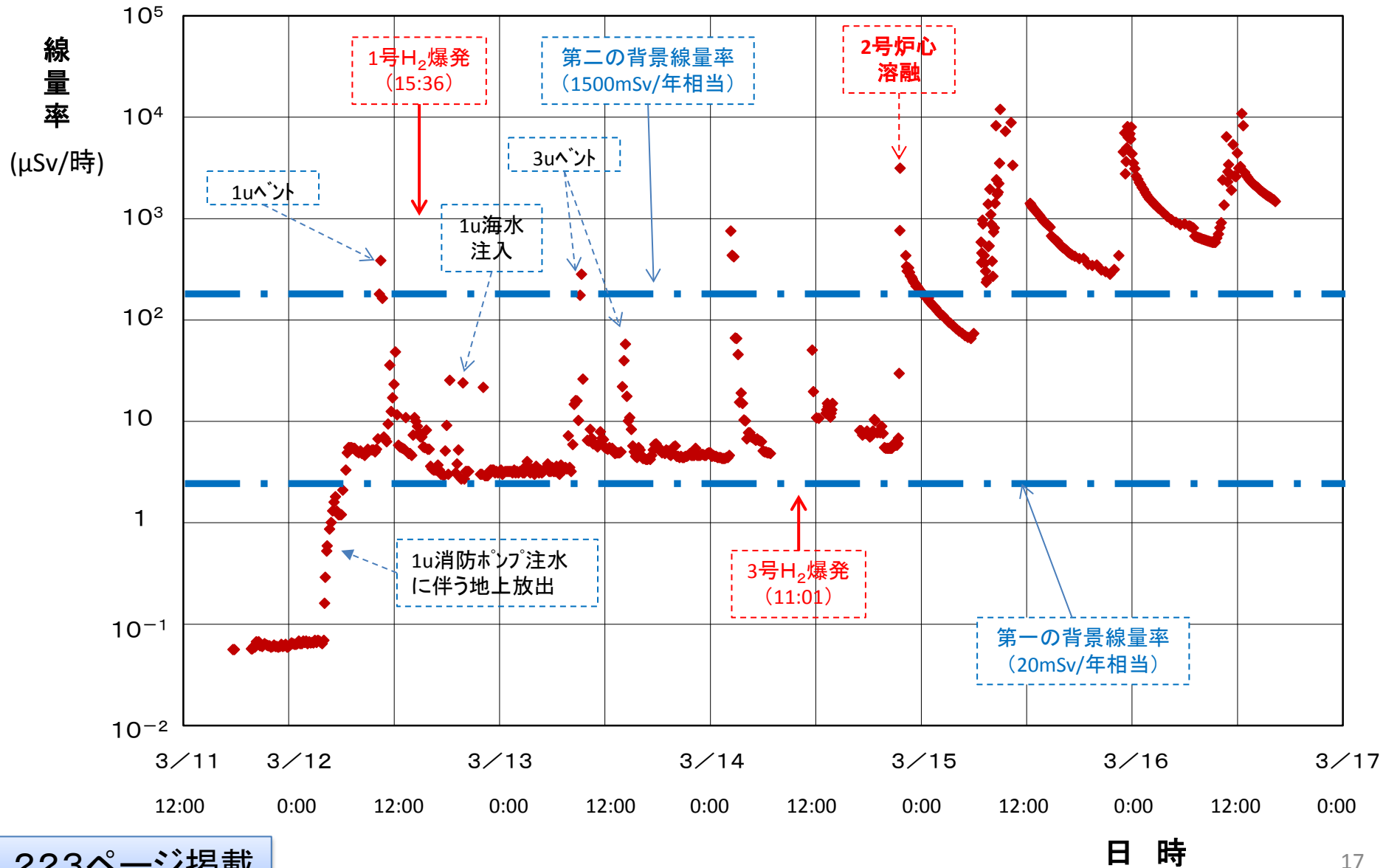
↓
10万人以上避難

3/22頃 仮設電源の敷設開始

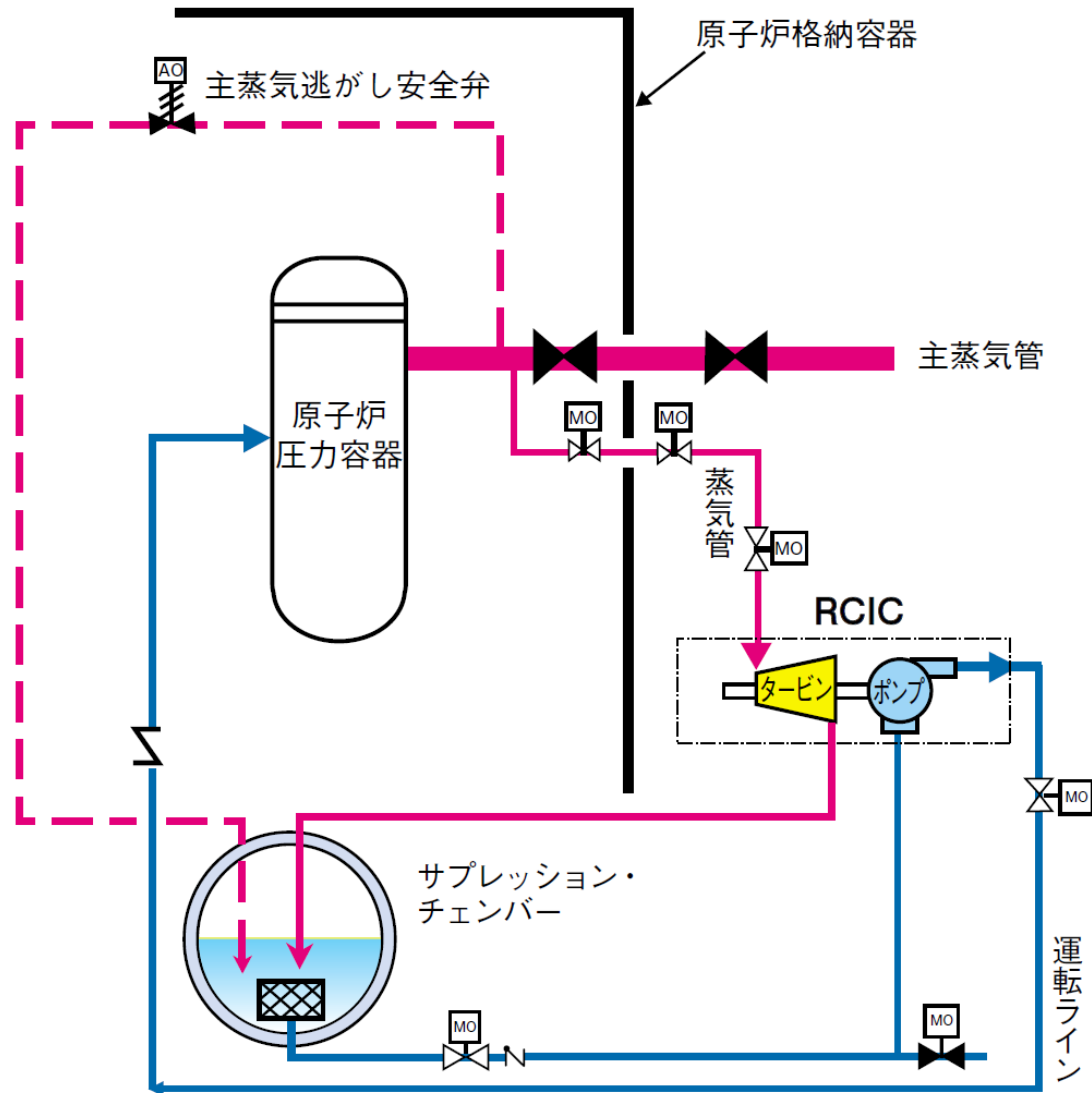
6月頃 循環冷却設備設置(沸騰停止)

	1号	2号	3号	4号
地震発生	2011年3月11日 午後2時46分			
津波到達	同上 午後3時35分			
炉心溶融	3/12 午前4時頃	3/14 午後10-11時頃	3/14 午前10時頃	—
爆発時刻	3/12 午後3時36分		3/14 午前11時1分	3/15 午前6時14分頃

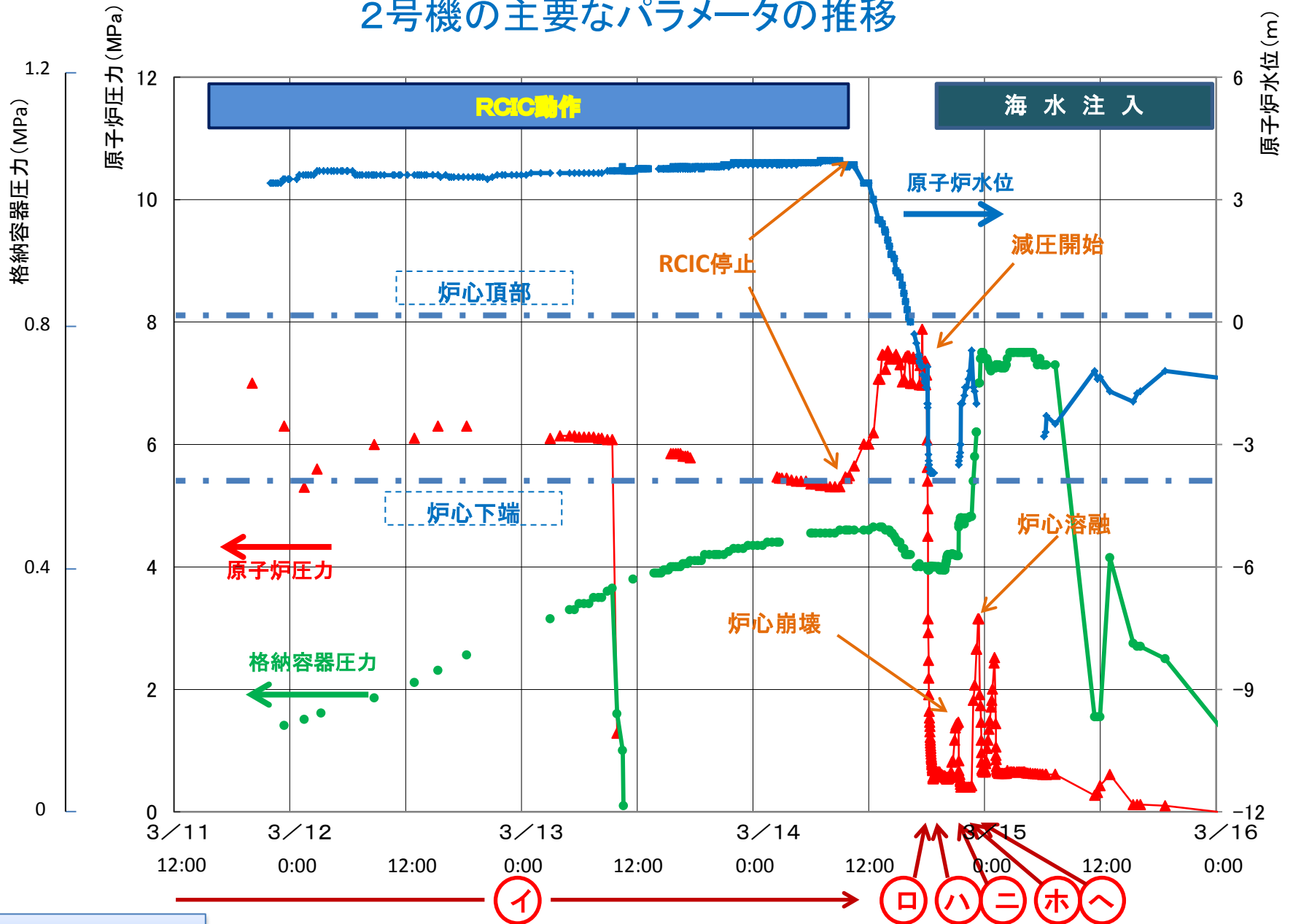
福島第一発電所の正門付近での線量率推移



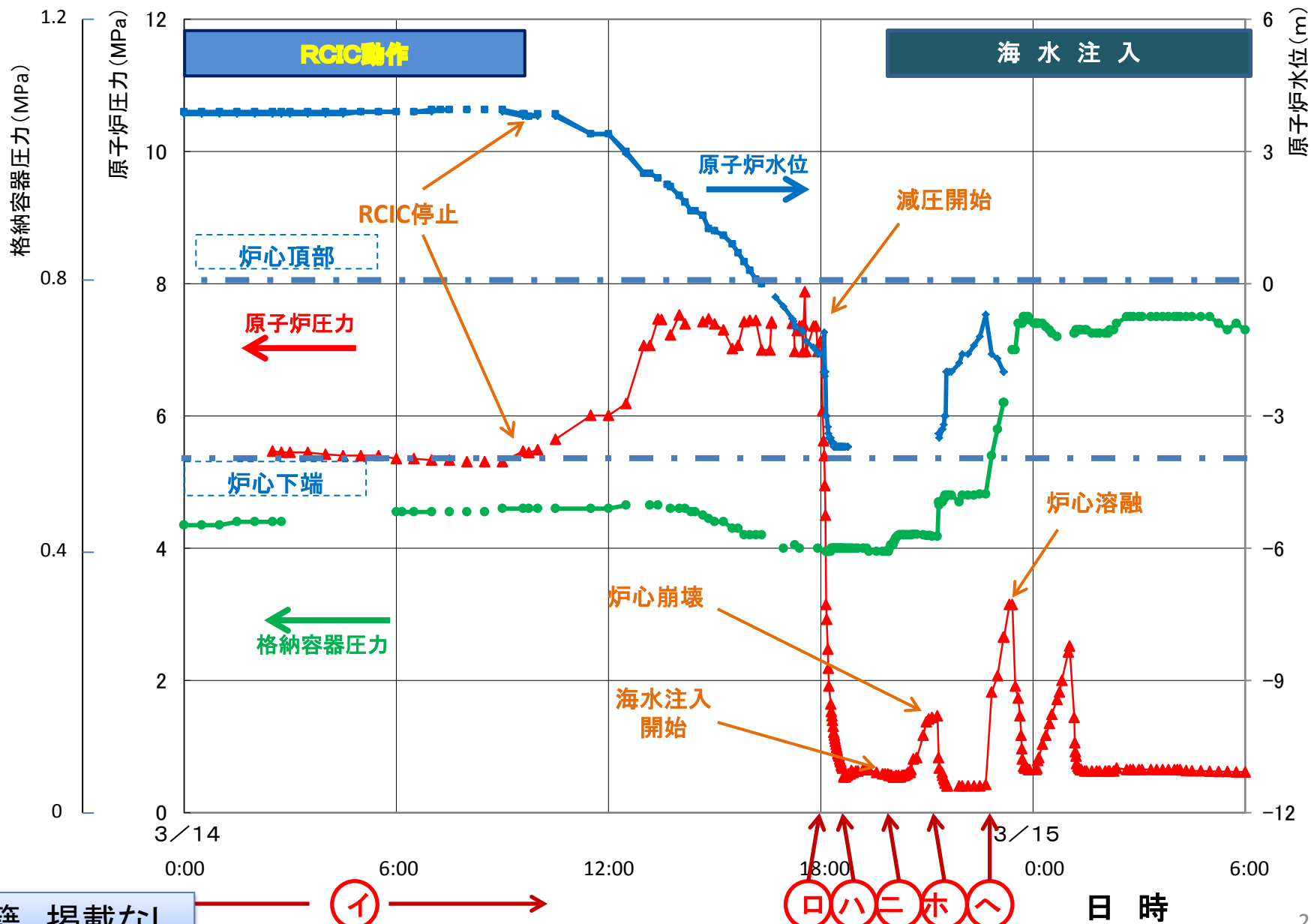
原子炉隔離時冷却系 (RCIC) 系統図



2号機の主要なパラメータの推移



2号機の主要なパラメータの推移(時間軸を拡大)

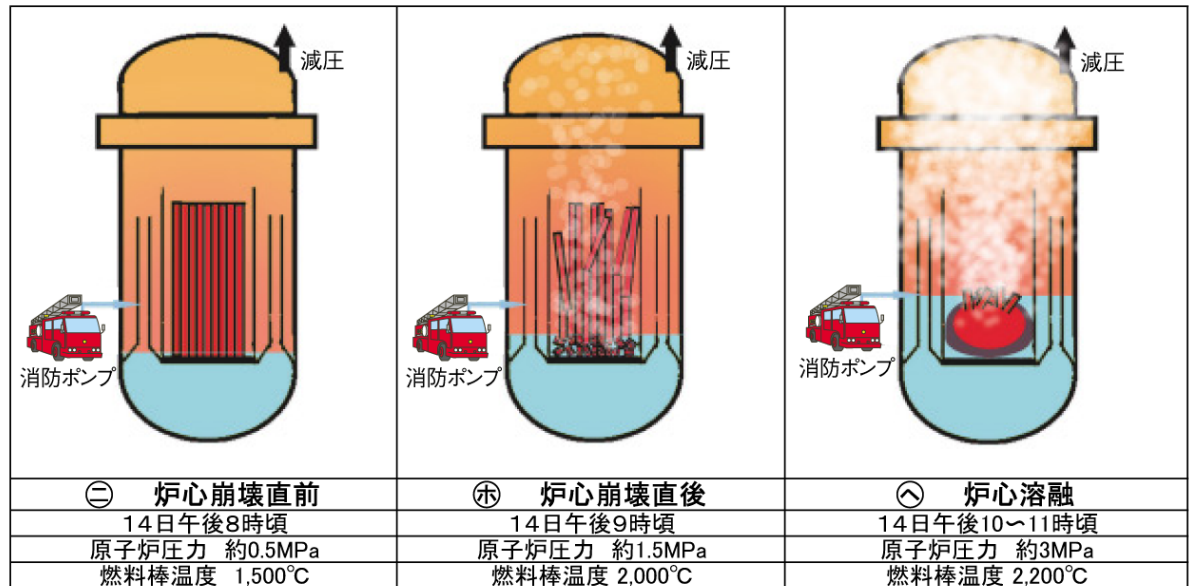
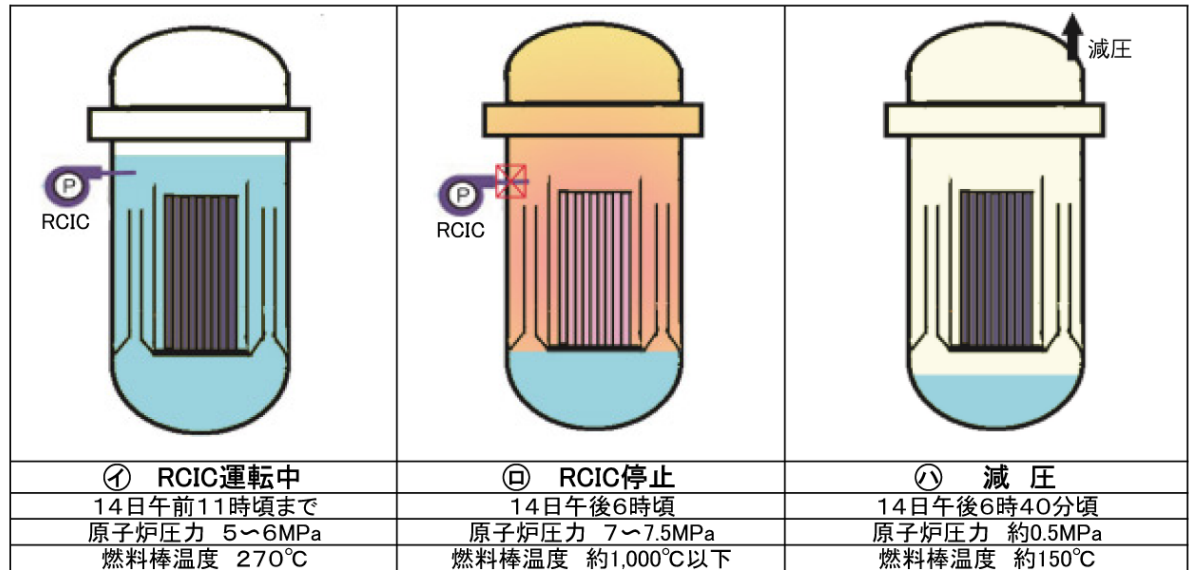


2号機の炉心状況の進展

減圧により一旦冷却した燃料は、注水が燃料下端に達するまでの間に、崩壊熱によって再び温度上昇。



注水に伴う熱衝撃により、下端部が座屈



熱輻射による放熱状況説明図

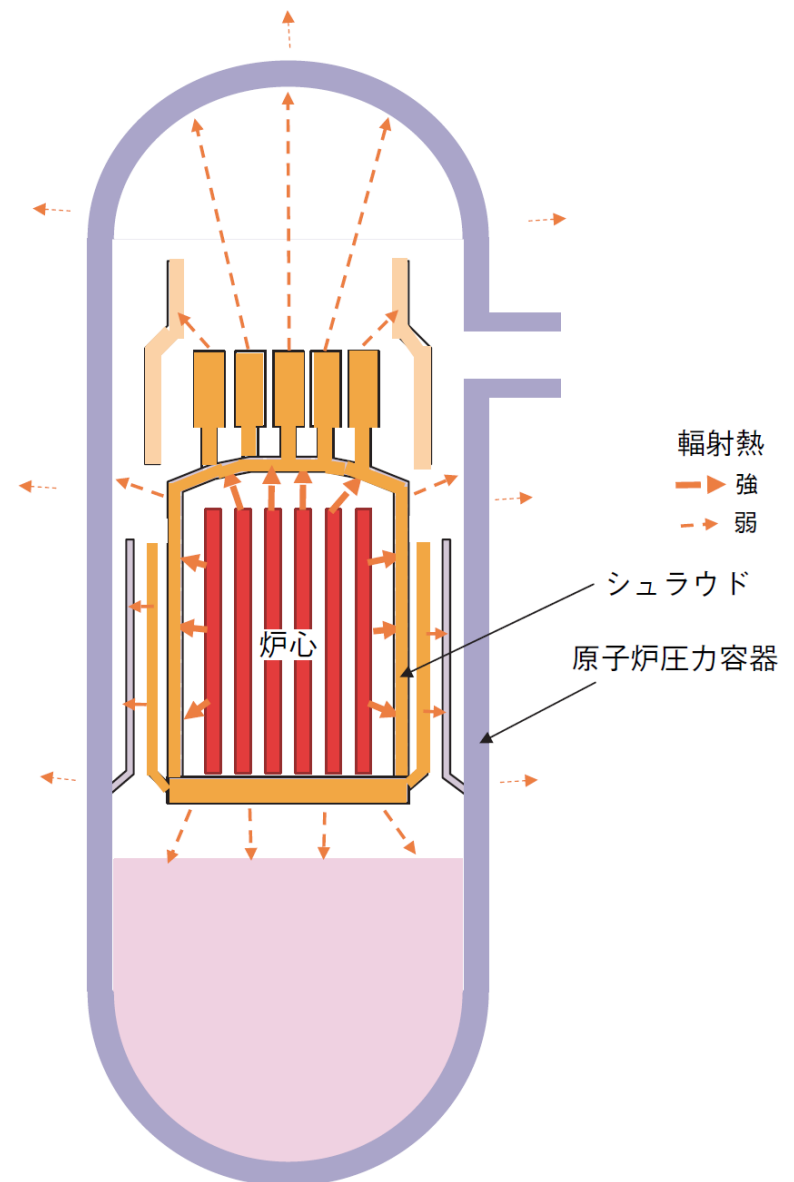
2号機では、右図の状況が出現
(輻射による放熱)

水が炉心から完全に無くなり、炉心が灼熱状態になっても、注水までの間、燃料の崩壊は発生していない。

1号機では、原子炉下部の冷却材が消失
超概算で、燃料棒は $2,000^{\circ}\text{C}$ 、原子炉圧力容器等の構造材は $5\sim 600^{\circ}\text{C}$ に達すると想像。

この場合、
融点の低いSUS鋼等は溶融し、
また、他の材料と混合溶融物を形成

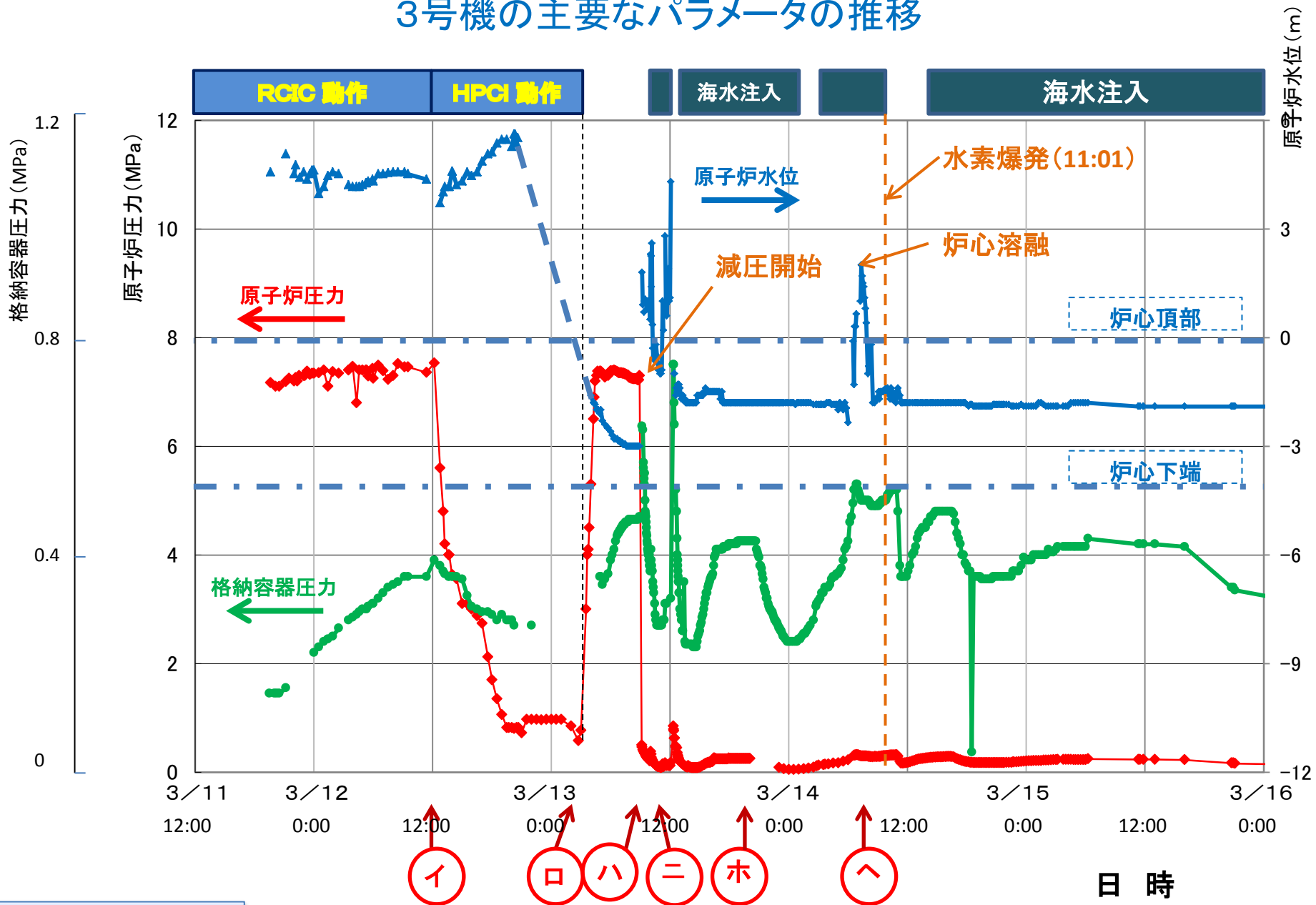
原子炉下部へ溶融落下したと考えられる。



2号機事故進展のまとめ

1. 水位が炉心から完全に無くなり、炉心が灼熱状態になっても、注水まで間、炉心燃料の崩壊は発生していない。
2. 注入された海水が炉心下端に達した時、燃料の分断、崩壊が発生
Zr-H₂O反応で炉心溶融が発生した。
3. 減圧と同時に注水が出来ていたら、炉心溶融は起きなかったと考えられる。
4. Zr-H₂O反応で大量の熱と水素とが発生し、格納容器上蓋が押し上げられて、その隙間から水素が漏れ出したと考えられる。
(SCを經由せず)ブローアウトパネル部から外部環境に放出)

3号機の主要なパラメータの推移



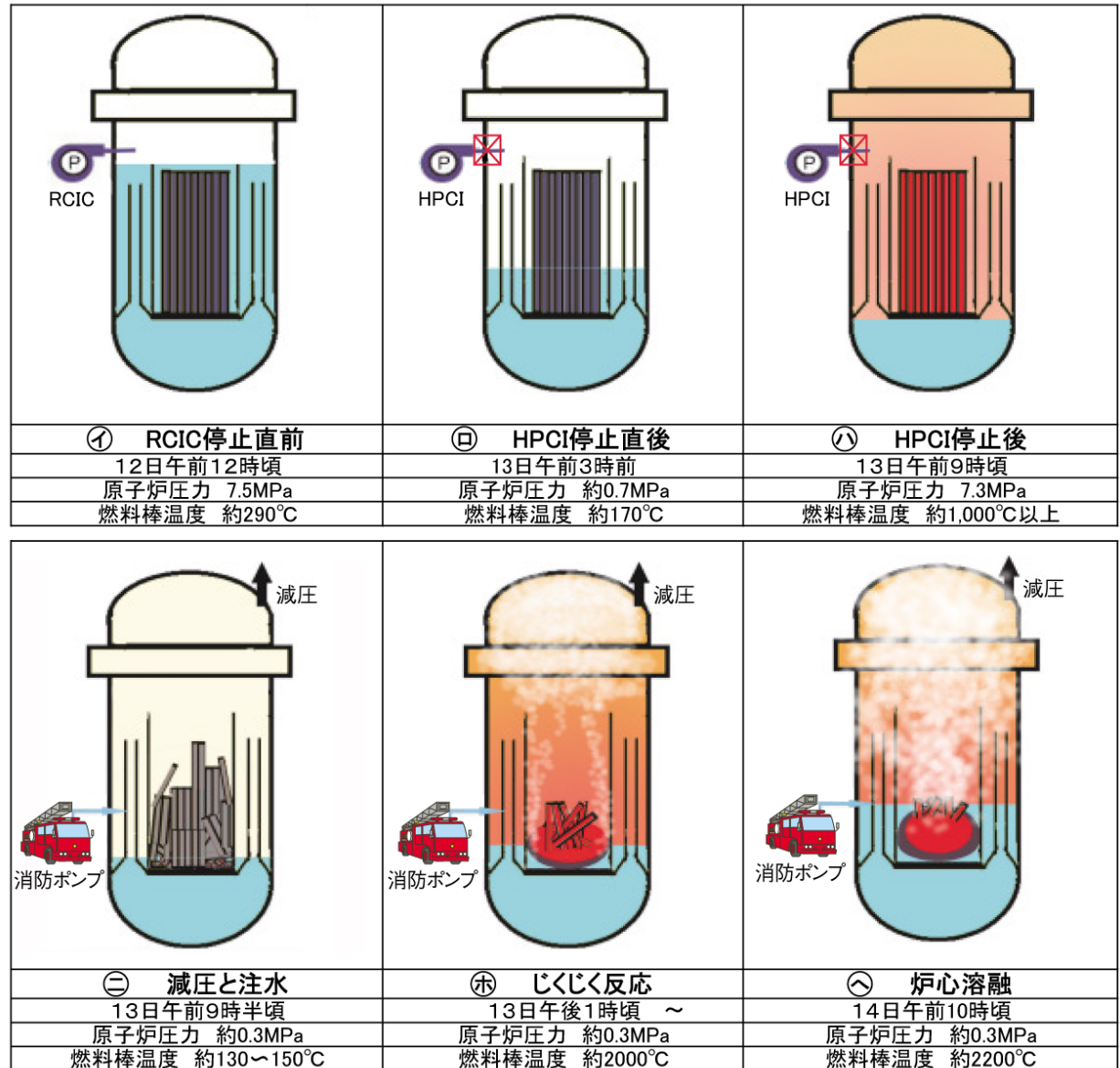
書籍 掲載なし

3号機の炉心状況の進展

減圧により一旦冷却した燃料は、注水までの間に、崩壊熱によって再び温度上昇。



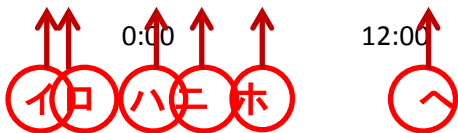
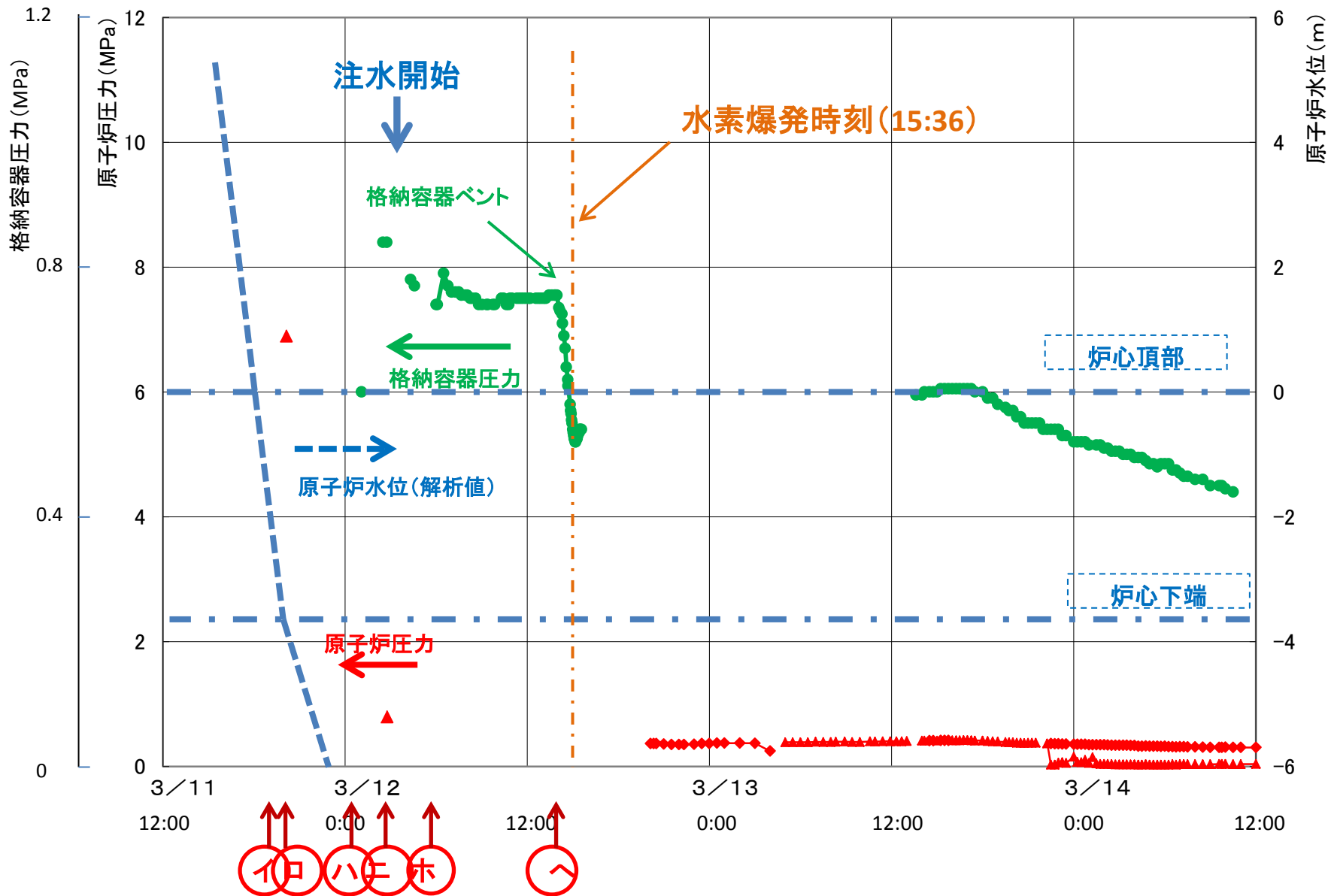
注水に伴う熱衝撃により、下端部が座屈



3号機事故進展のまとめ

1. 炉心溶融は、2号機と同様にZr-H₂O反応による発熱である。
2. 発生した大量の水素ガスは、格納容器上蓋、遮蔽プラグを押し上げて、原子炉建屋に流入し、
3. 爆発の着火源は、持ち上げられた遮蔽プラグが落下した時の衝撃
4. 消防ポンプでの注水は少なく、時間を要した。
このため、混合溶融物と水との反応は活発でなく、「じくじく」と時間をかけて持続した。
5. HPCIを停止せず、減圧注水を行っていれば、炉心溶融は起きなかったものと考えられる。

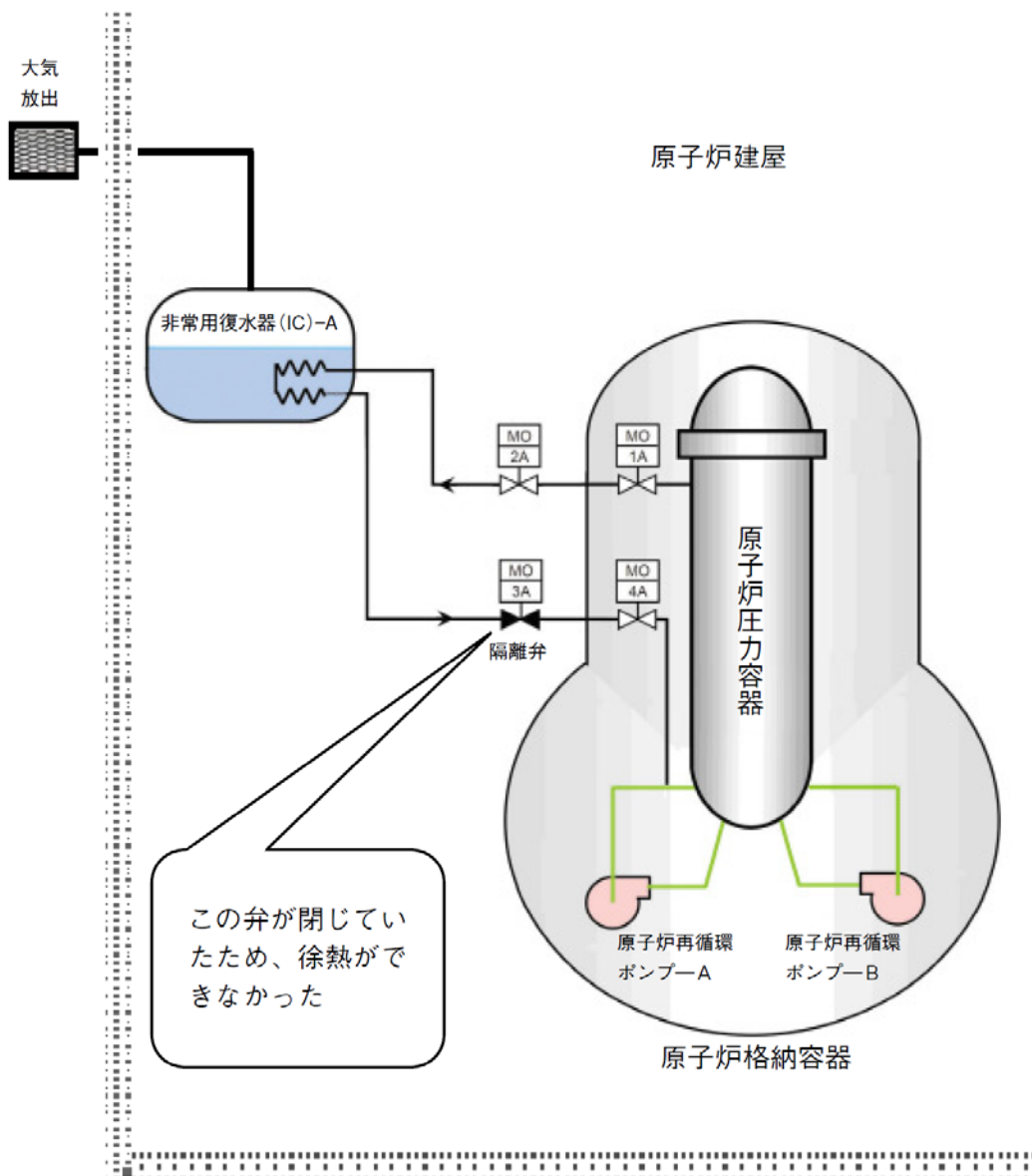
1号機の主要なパラメータの推移



書籍 掲載なし

日時

1号機の非常用復水器(IC)の系統図



熱輻射による放熱状況説明図

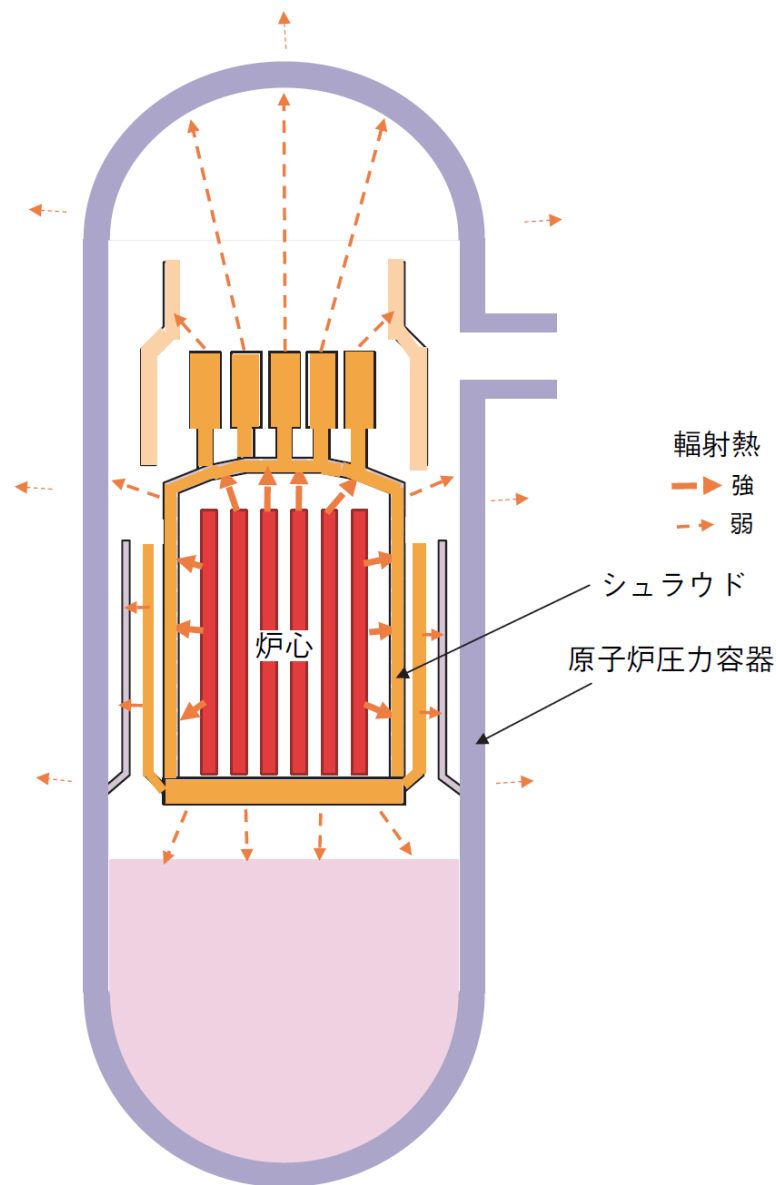
2号機では、右図の状況が出現
(輻射による放熱)

水が炉心から完全に無くなり、炉心が灼熱状態になっても、注水までの間、燃料の崩壊は発生していない。

1号機では、原子炉下部の冷却材が消失
超概算で、燃料棒は $2,000^{\circ}\text{C}$ 、原子炉圧力容器等の構造材は $5\sim 600^{\circ}\text{C}$ に達すると想像。

この場合、
融点の低いSUS鋼等は溶融し、
また、他の材料と混合溶融物を形成

原子炉下部へ溶融落下したと考えられる。



1号機事故進展のまとめ

1. 原子炉圧力容器から完全に水が無くなった状態が4時間も続き、その間、原子炉圧力容器の中では熱輻射による放熱が続いた。
(全く新しい事故状態)
2. 熱輻射による放熱状態での炉心温度は、U-Zr-Oの混合溶融物の融点に近い2,000°C程度で、放熱平衡となっていたと考えられる。この時、原子炉圧力容器の温度は550～600°C程度に上昇していたと考えられる。
3. 崩壊した炉心の一部は、原子炉圧力容器の底を破って格納容器の床に堆積し、海水と反応して水素ガスを発生させた。
4. 発生した水素ガスは、遮蔽プラグを押し上げて、原子炉建屋に流入し、持ち上げられた遮蔽プラグが落下した時の衝撃で着火

原子炉ボルトの圧力上昇

遮蔽プラグ

厚さは約2m、総重量約600トン
コンクリートの比重2.3とすれば、
約0.5気圧で浮上

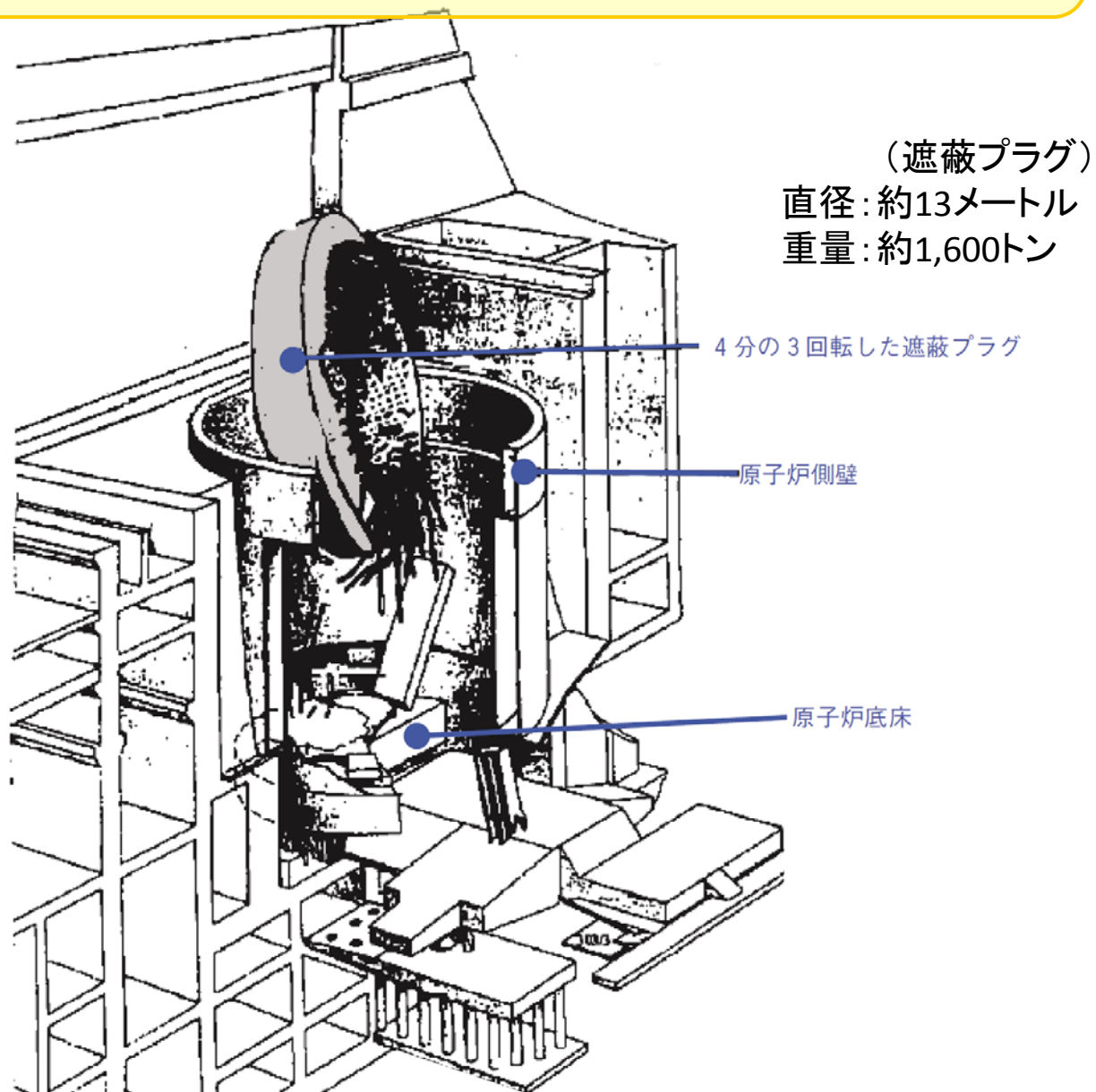
格納容器
フランジ

原子炉ボルト
自由体積
約200m³

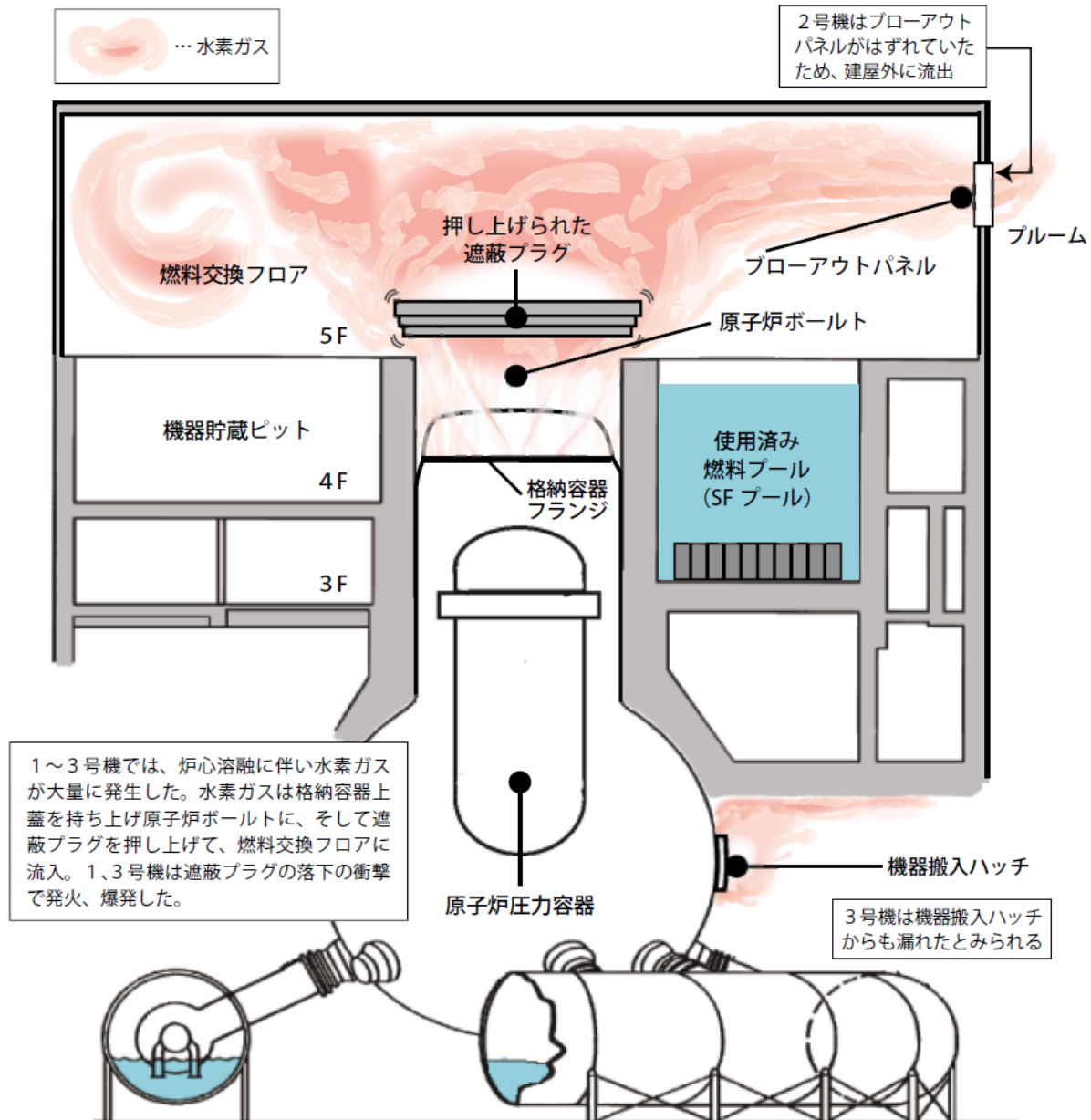
事故時にドライウェル圧力は最大約8気圧まで上昇。
体積比率よりフランジ部からの漏えいがあれば、
ボルト部の圧力は簡単に0.5気圧を超える。

自由体積
約6700m³

事故後のチェルノブイリ炉の状況図

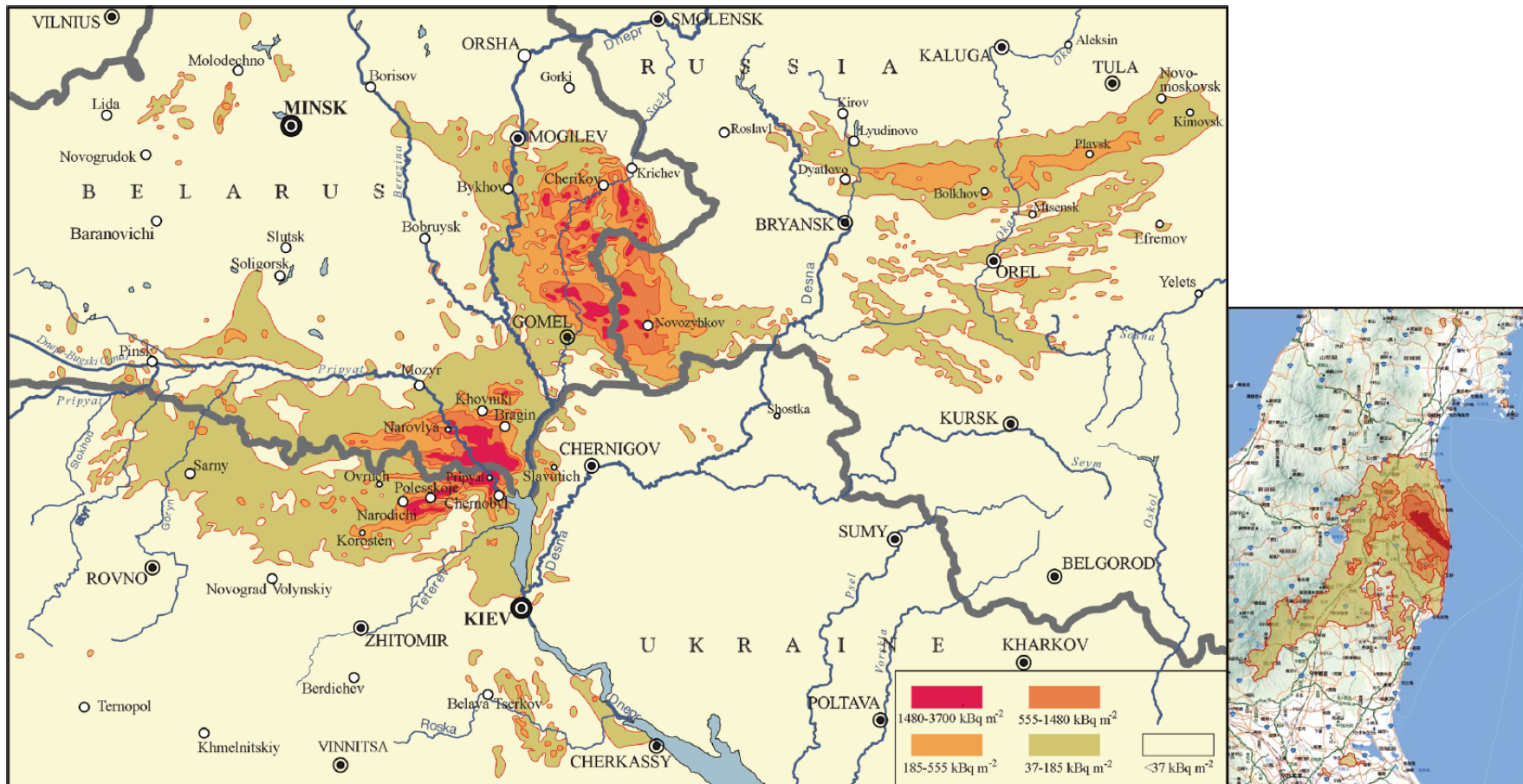


1～3号機の水素ガスの漏出経路図

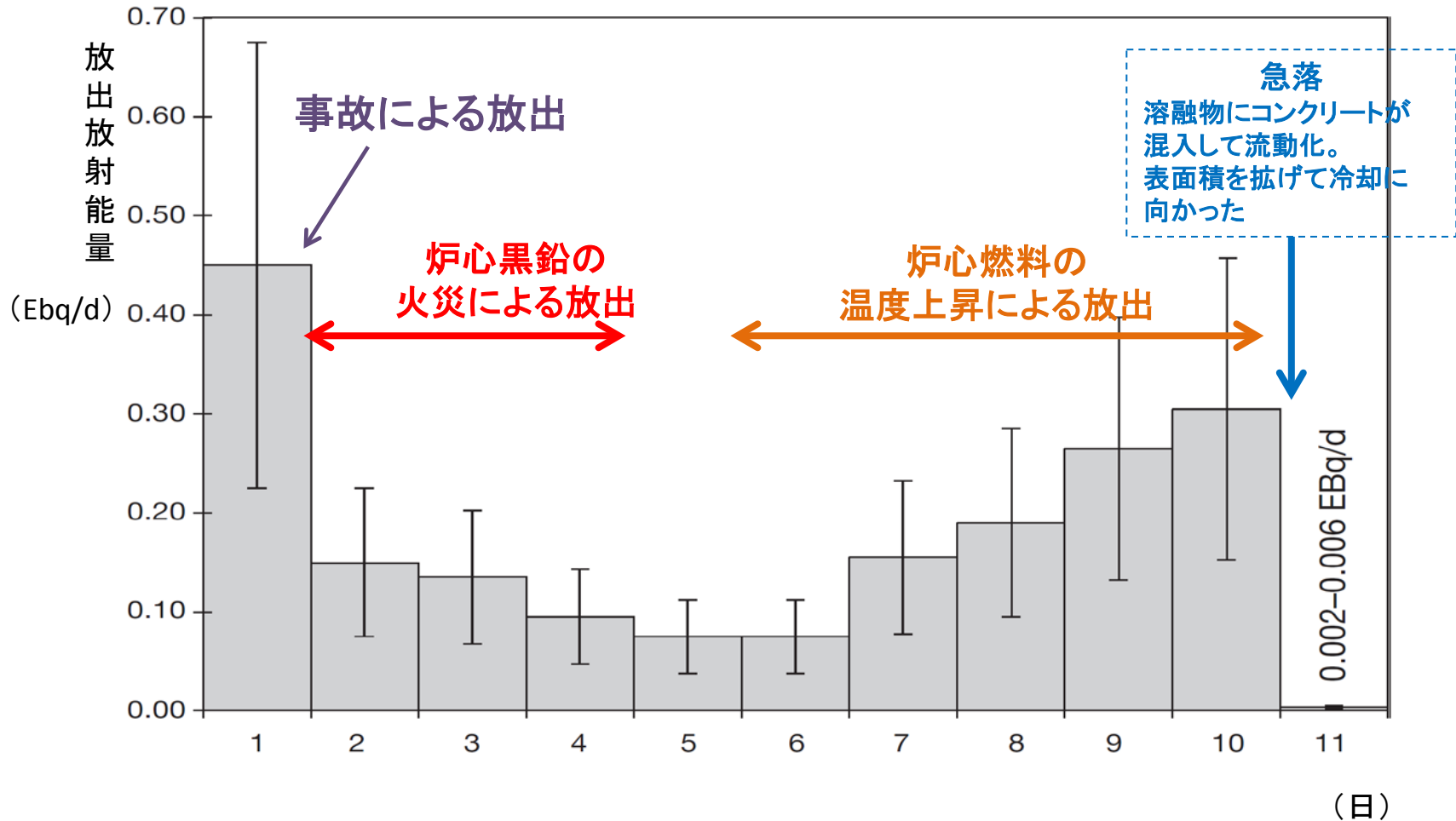


チェルノブイリと福島汚染区域の比較図

福島1～3号機の合計出力は、チェルノブイリ4号の2倍以上。(RIインベントリが2倍以上)
しかし、格納容器の存在と、1, 3号機でのSCベントにより放射能放出量を低減。
SCベントの除染係数は高く、非常に有効。



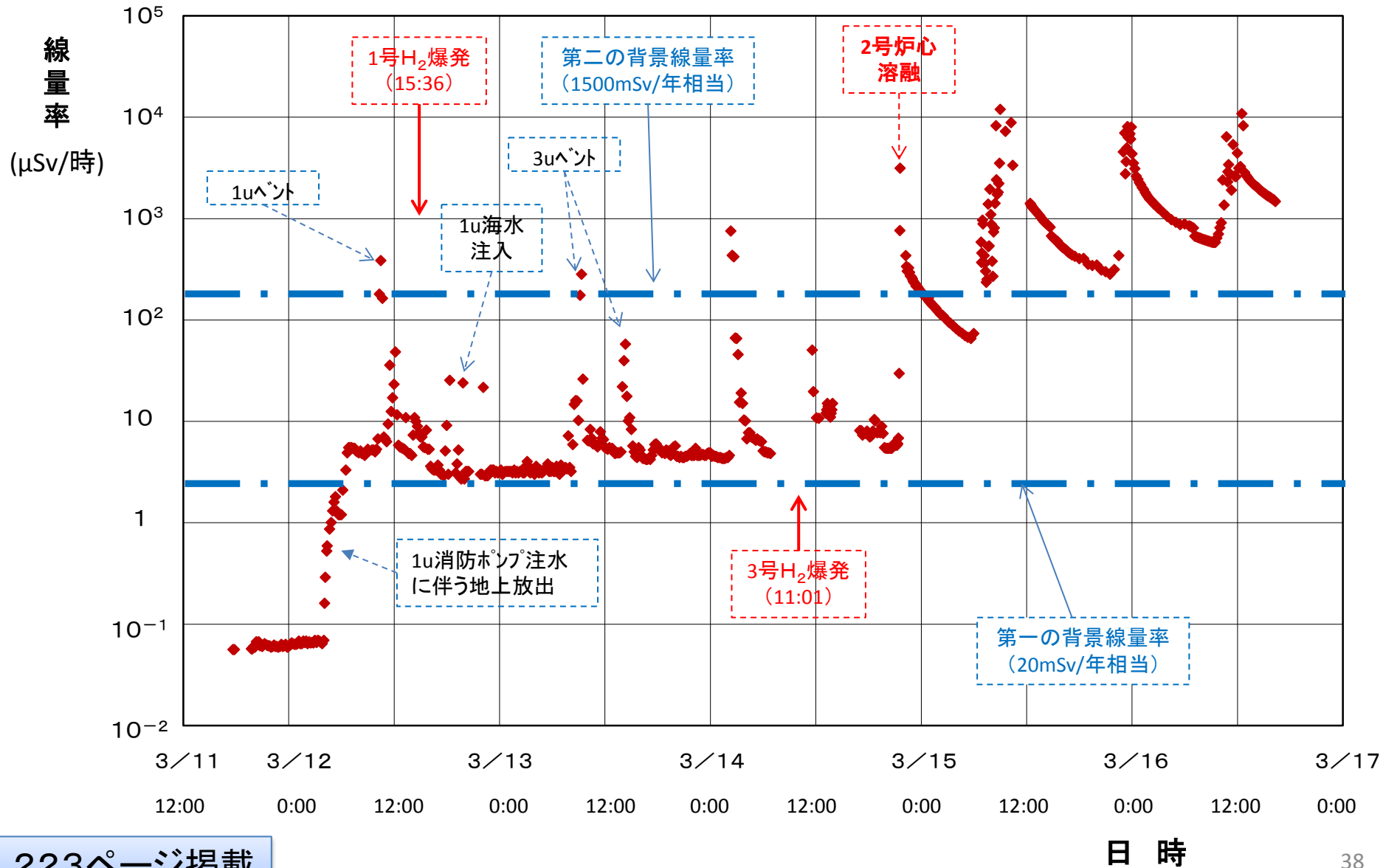
事故後のチェルノブイリ炉からの放射能放出量の変化



TMI、チェルノブイリおよび福島 of 災害比較

	避難者数	被曝線量 (mSv)		出典
		最大	平均	
TMI	約1,000名 (自主避難： 約150,000人)	約 1 mSv	約0.01mSv	「原子炉の暴走」 p. 361
チェルノ ブイリ	約130,000名	約5,000mSv	約100mSv	
福島	約157,000名 (1)	25mSv (2)	0.8mSv (2)	(1)地震・津波・原発事故等 にともなう総避難者数 (H24.12.6福島県災害 対策本部発表) (2)福島県 第13回「県民健 康管理調査」検討委員会 資料 (H25.11.12)

福島第一発電所の正門付近での線量率推移



放射能放出のまとめ

1. 背景放射線線量率の変化より、
 - ① 福島事故での放射能放出は、事故翌日の午前4時に消防ポンプ注水作業に伴う漏れにより開始。
 - ② 1、3号機のベントが開いて溶融炉心の放射能を放出したが、背景線量率はほとんど変わらない。
 - ③ 14日深夜、SCベントに失敗した2号機格納容器から、溶融炉心の放射能が直接放出されることで背景線量率が再上昇。
2. 4基もの溶融または爆発があったにも関わらず、福島事故の災害状況は、チェルノブイリと比較して軽微であった。
3. もし2号機のベントが成功していれば、放出放射能はSC除染が期待できるので、敷地外の線量率は毎時数 $\mu\text{Sv}/\text{時}$ 程度に止まったと考えられる。(避難の必要がないレベル)

本日説明した主な考証結果

1. 高温燃料棒は、急冷されると熱衝撃が発生し、崩壊
2. 炉心溶融は、崩壊熱でなく、Zr-水の化学反応による発熱
3. 溶融炉心は、酸化物の殻で覆われ、激しい反応は起きない
4. 減圧と注水は、炉心溶融を防ぐのに有効だが、同時実施が必要
5. 水素ガスは、格納容器のフランジ、次に遮蔽プラグを持上げ漏出
6. 1, 3号機は、遮蔽プラグ落下の衝撃により水素爆発
7. SCベントは、除染効果が大きく、有効