

水蒸気爆発及び水素爆発の危険性

2015. 11. 14

中西正之
学習会

「玄海原発の再稼働の是非を問う」 V 2

Unit 3

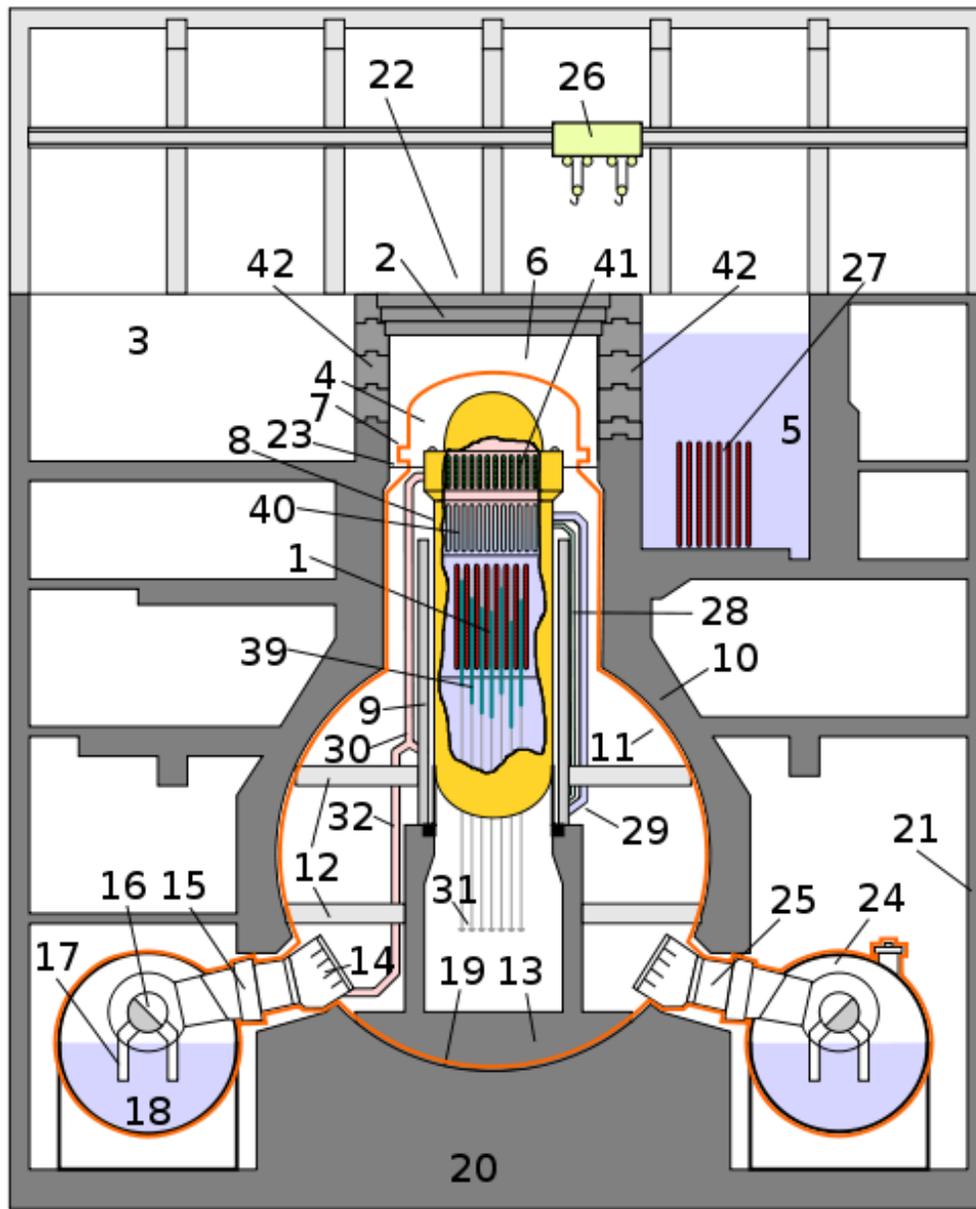
日本では過酷事故は起こらないと考え続けられてきたので、十分な対策は行われなかった。ところが、2011年3月11日に福島第一原発で過酷事故が起こり、原発の再稼働の為には、過酷事故対策が必要になり、新しく設置された原子力規制委員会により、過酷事故対策を行ったという新規制基準が策定された。

March 14, 2011



福島第一原発3号炉の爆発
原子炉建屋は爆轟破壊したが、頑丈な格納容器は破損しなかったため、放射性物質の飛散量は格納容器が破れた2号炉よりも少なかった。水素爆発と言われてきたが、水素だけでは爆発が大きすぎ、MCCI(溶融炉心・コンクリート反応)による一酸化炭素との複合爆発と思われる。

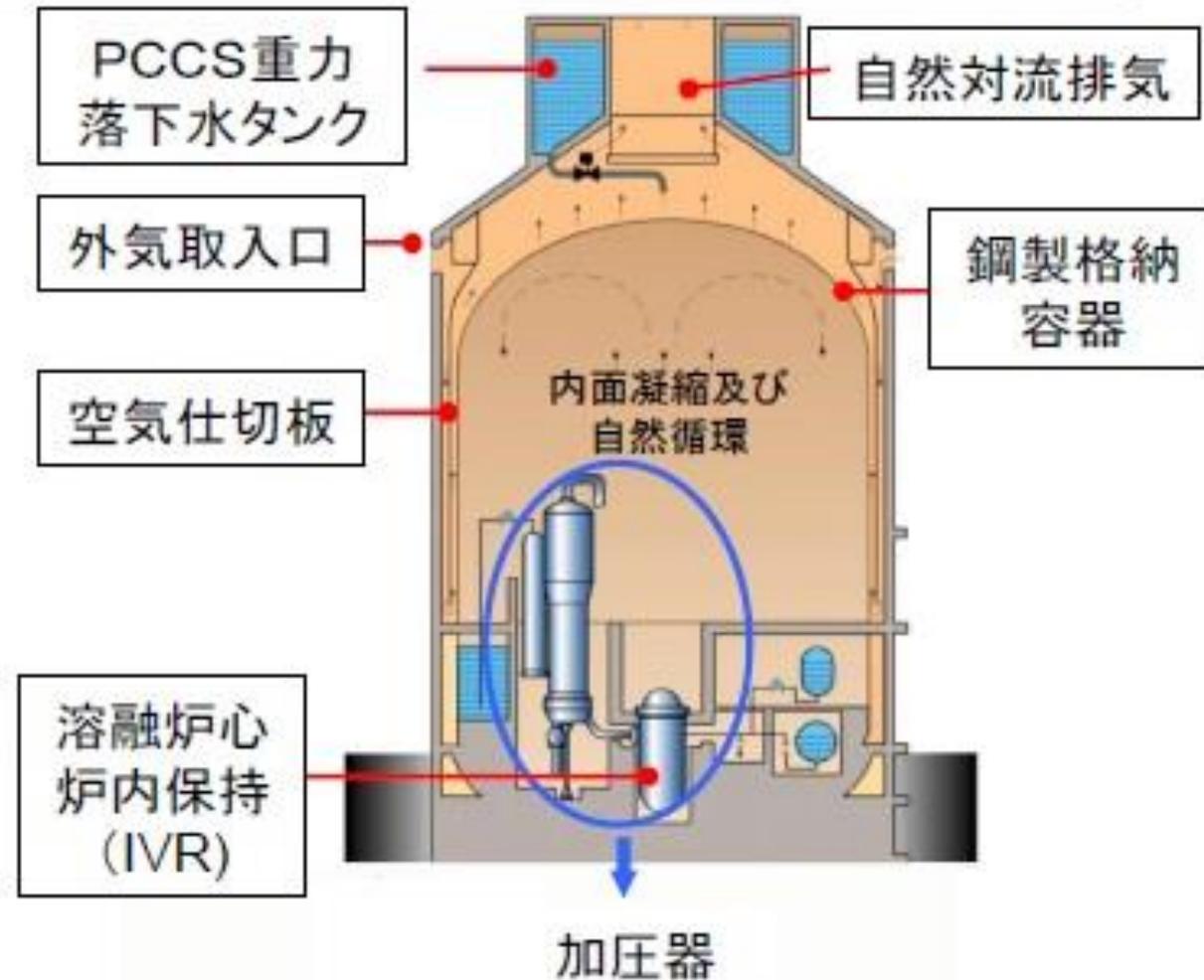
ただ、起きたのがガス爆発で、水蒸気爆発は起こらなかったため、これまで水素爆発問題のみが、注目されてきた。



1号炉3号炉4号炉は原子炉建屋上部は爆発喪失したが、**格納容器はほとんど無傷**。放射性物質の飛散量はチェルノブイリよりかなり少なかった。4号炉は定期点検中で有ったので、原子炉内の使用済み燃料は5番の空中使用済み燃料プールに保管されていた。3号炉から漏洩してきた可燃ガス（水素＋一酸化炭素）により爆発が起きたが、空中使用済み燃料プールの水が無く成ると、チェイナシンドロームが起こり250km圏に人が住めなくなるところであった。

福島第一原発1・2・3・4号炉の格納容器と原子炉建屋

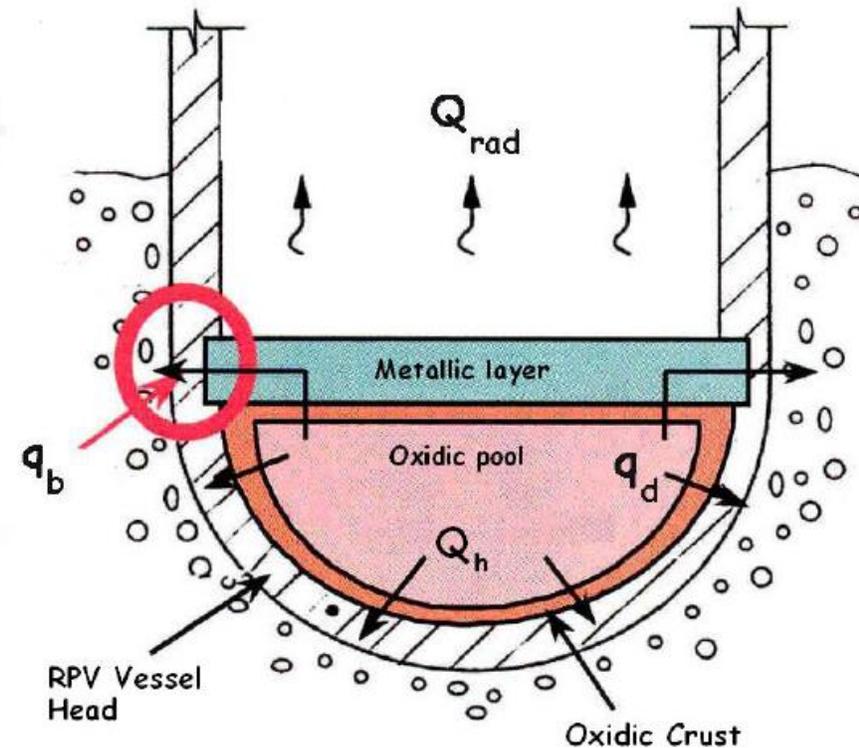
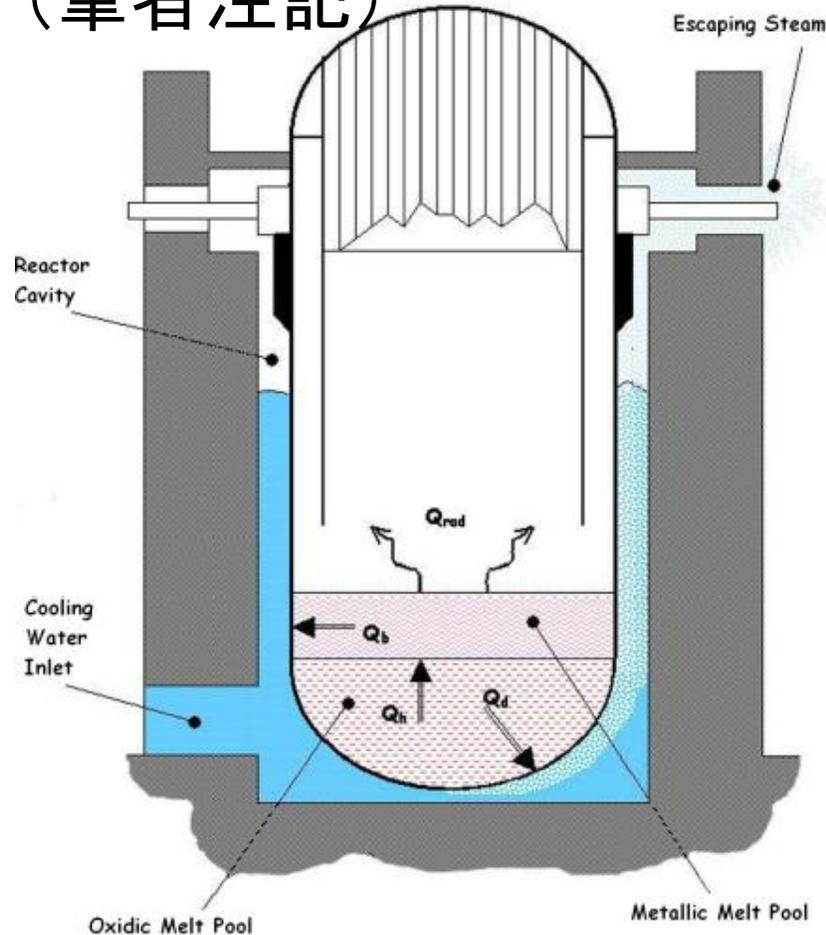
AP1000 PCS:格納容器壁面冷却



出典 畑のたより [川内原発パブコメ\(9\) 格納容器再循環ユニットによる除熱は不確実、静的格納容器冷却系\(PCCS\)の設置を求める。 \[核のガバナンス・川内原発\]](#)

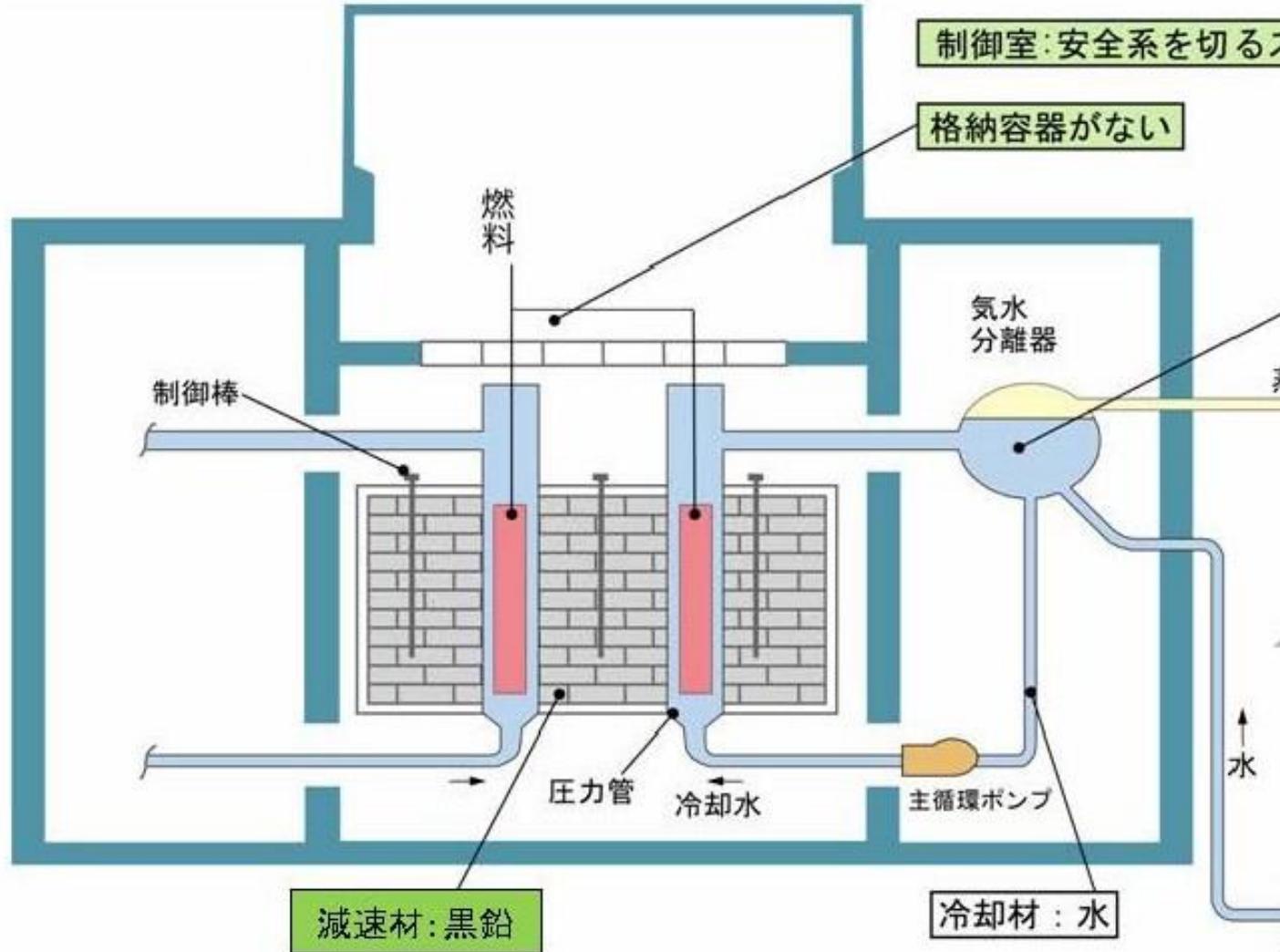
初めは、スリーマイル島でのシビアアクシデントにおいて、原子炉圧力容器の健全性が維持されたので、溶融炉心の原子炉容器内保持 (IVR) の可能性が研究された。東芝社の大赤字の原因と言われているアメリカのウエスチングハウス社が開発したAP1000の原子炉で圧力容器内コリウムの保持 (IVR) が行われた。しかし、圧力容器破断の可能性があり、信頼性に欠けており失敗作だったと思われる。(筆者注釈)

原子炉内で発生するコリウムは原子量の大きいウランやプルトニウムの酸化物を大量に含み、その溶融酸化物は鉄やステンレス等の溶融金属の比重に比べて、少しだけ大きく、熱伝導率の大きい溶融金属部で圧力容器が浸食される。(筆者注記)

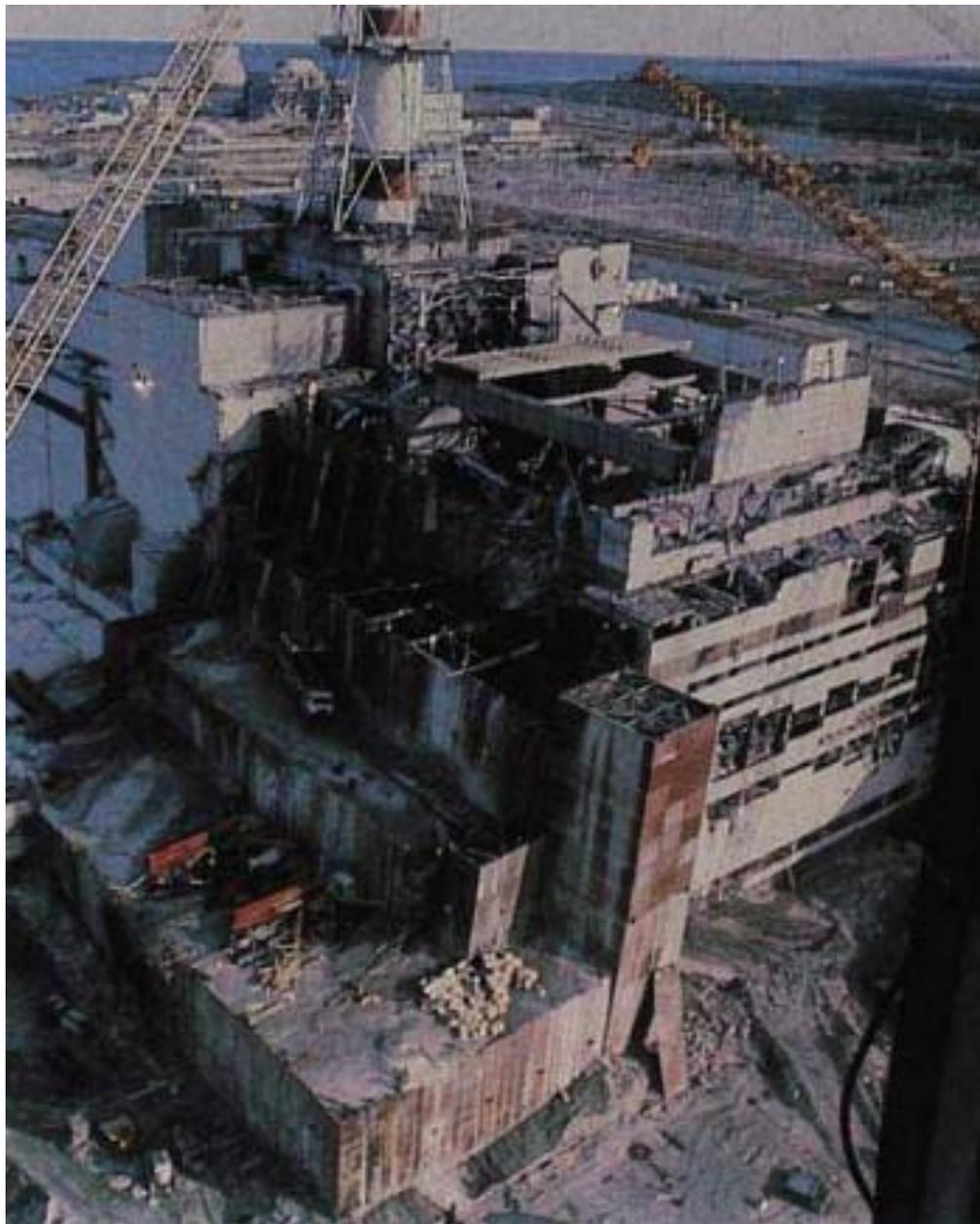


出典 Jiří Duspiva, *Comparison of In-Vessel and Ex-Vessel Retention*,
Nuclear Codes & Standards Workshop, Prague, July 7-8,
2014

チェルノブイリ原子力発電所の事故



1979年3月28日にアメリカのスリーマイル島で過酷事故が発生し、続けて1986年4月26日に旧ソ連のチェルノブイリで過酷事故が発生し、世界的には過酷事故が起きた場合の、緩和設計が重視されるようになった。

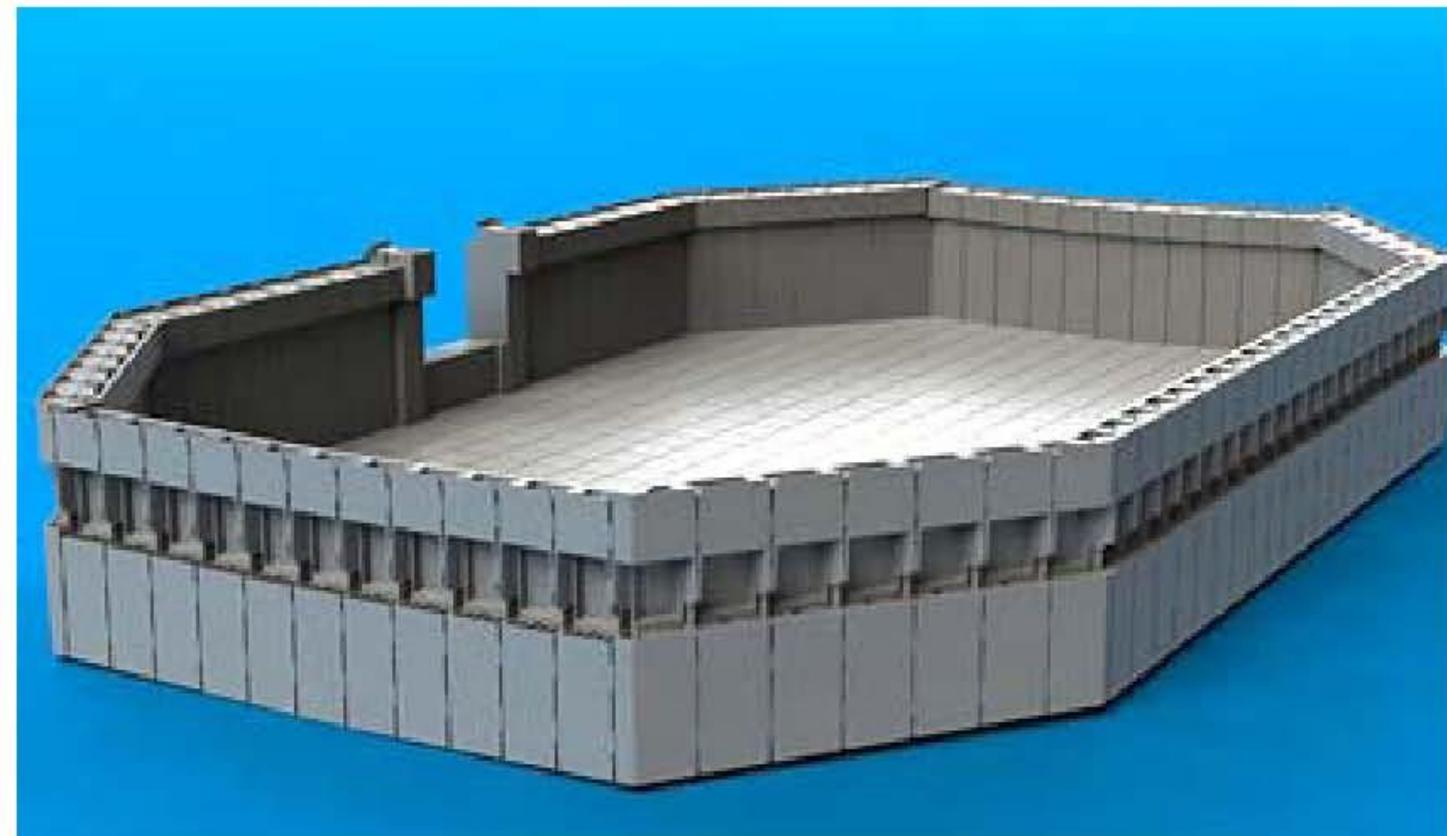


チェルノブイリ原発の事故直後の写真

原発事故で破壊された建物の写真です。現在では、この上が放射能の拡散を防ぐ為にコンクリートで覆われています。チェルノブイリ原発は格納容器が無く、爆轟で熔融核燃料が野ざらしになり、520万テラベクレルの放射性物質放出された。

ロシアの新型原子炉VVER-1000についてのKhabenskyの論文

Khabenskyの論文の神髄は大量の水は使わず、水蒸気爆発と水素爆発が起こらないメルトダウン対策である。現代の原子力発電所の設計は、格納容器内の核燃料溶融を局部的に保持する装置を必要とする。まず外部容器表面の受動冷却と組み合わせた容器内コリウムの保持(IVR)が開発された。現在では、小規模および普通の出力量炉で可能である。大型炉(1000 MW以上)は適切な安全余裕が無いため、IVRの設計は安全では無い。他の方法は、圧力容器外コリウムの保持(EVR)の設計である。この方法のもっとも悪いものは、BWR型原子炉においてスウェーデンで容認された。この設計は、原子炉下部のキャビティの水で満たされたコンクリートピットで溶融炉心処理する。しかし、この設計はFCI(燃料・冷却剤相互反応)による水蒸気爆轟の危険があり世界の広範囲な人の承認を得られていない。現在のEVRには、2つの概念が完全に開発され適用されている: 欧州EPR原子炉のために開発され溶液拡散キャッチャーとVVER-1000で原子炉ロシアの原子力発電所のために開発されたるつぼ型キャッチャーである。」



フランスのアレバ社が開発した次世代型のEPRのコアキャッチャー。旧ソ連のチェノブイリでのシビアアクシデントにおいて、原子炉容器そのものが破壊されたので、溶融炉心の原子炉容器外保持(EVR)の可能性の研究も盛んに行われるようになった。プレキャッチャー内に犠牲物質を内張りし、それに含まれる中性子吸収材とコリウムを反応させて、再臨界を防止する。

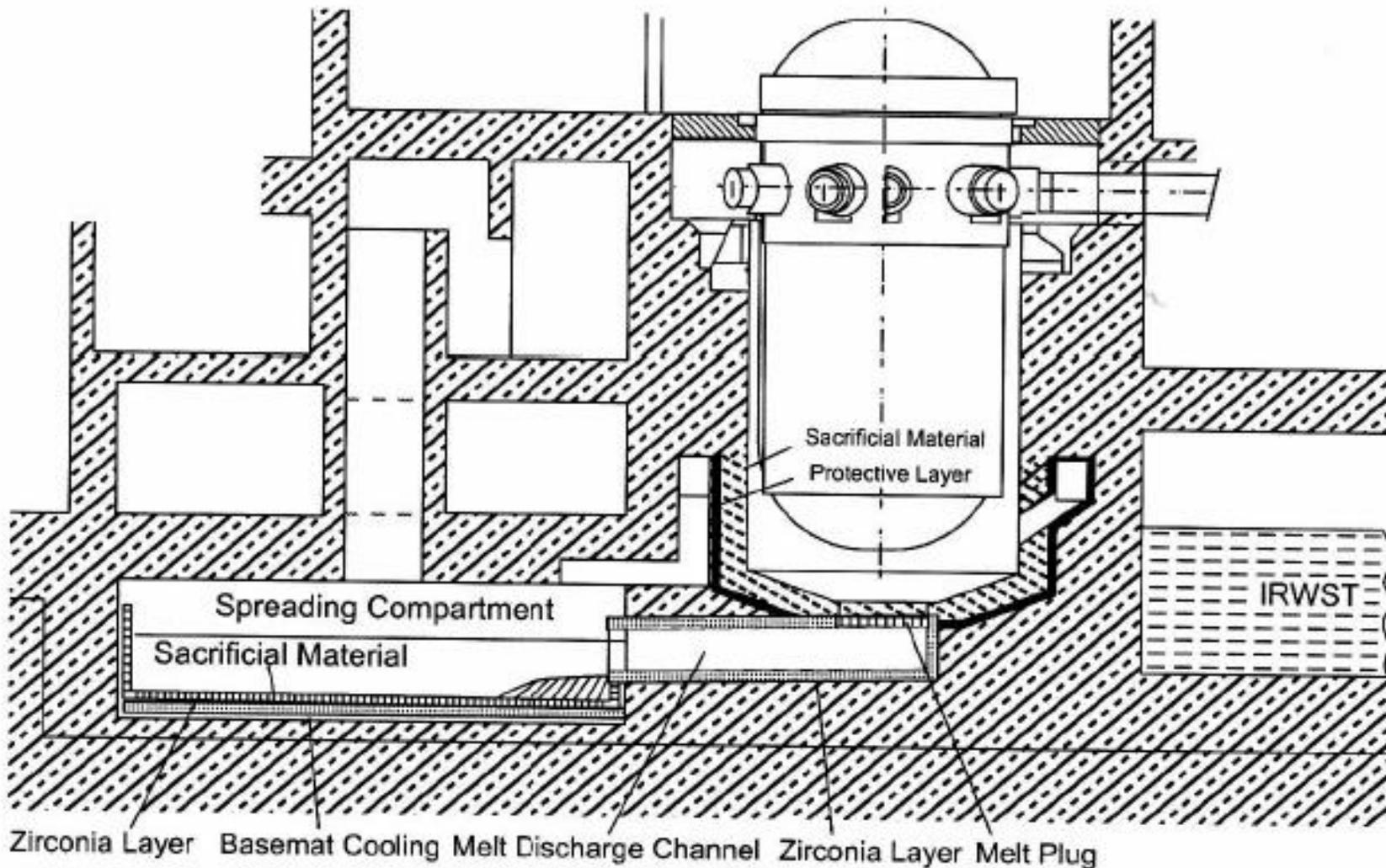
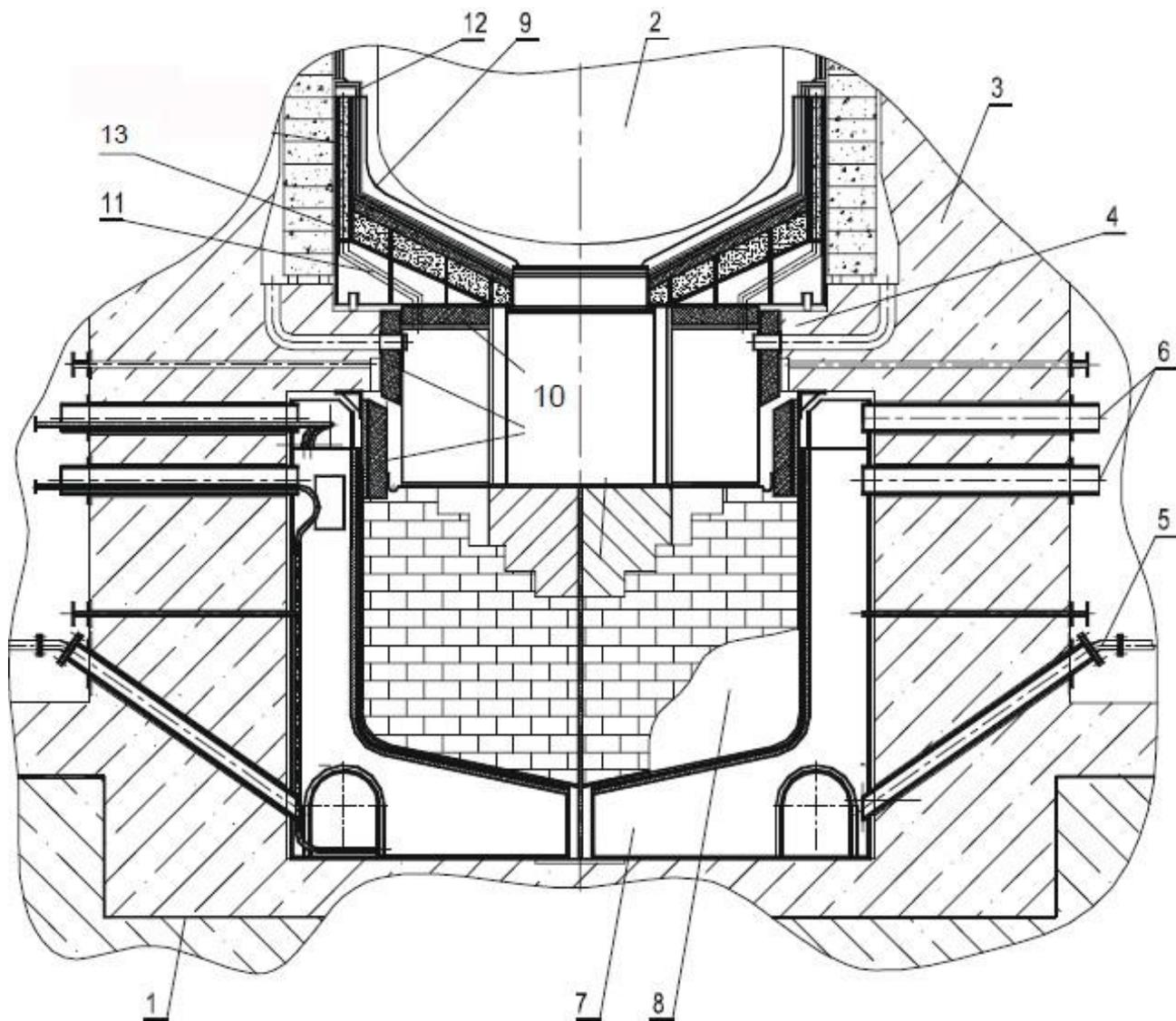


FIGURE 1.31 EPR core catcher.

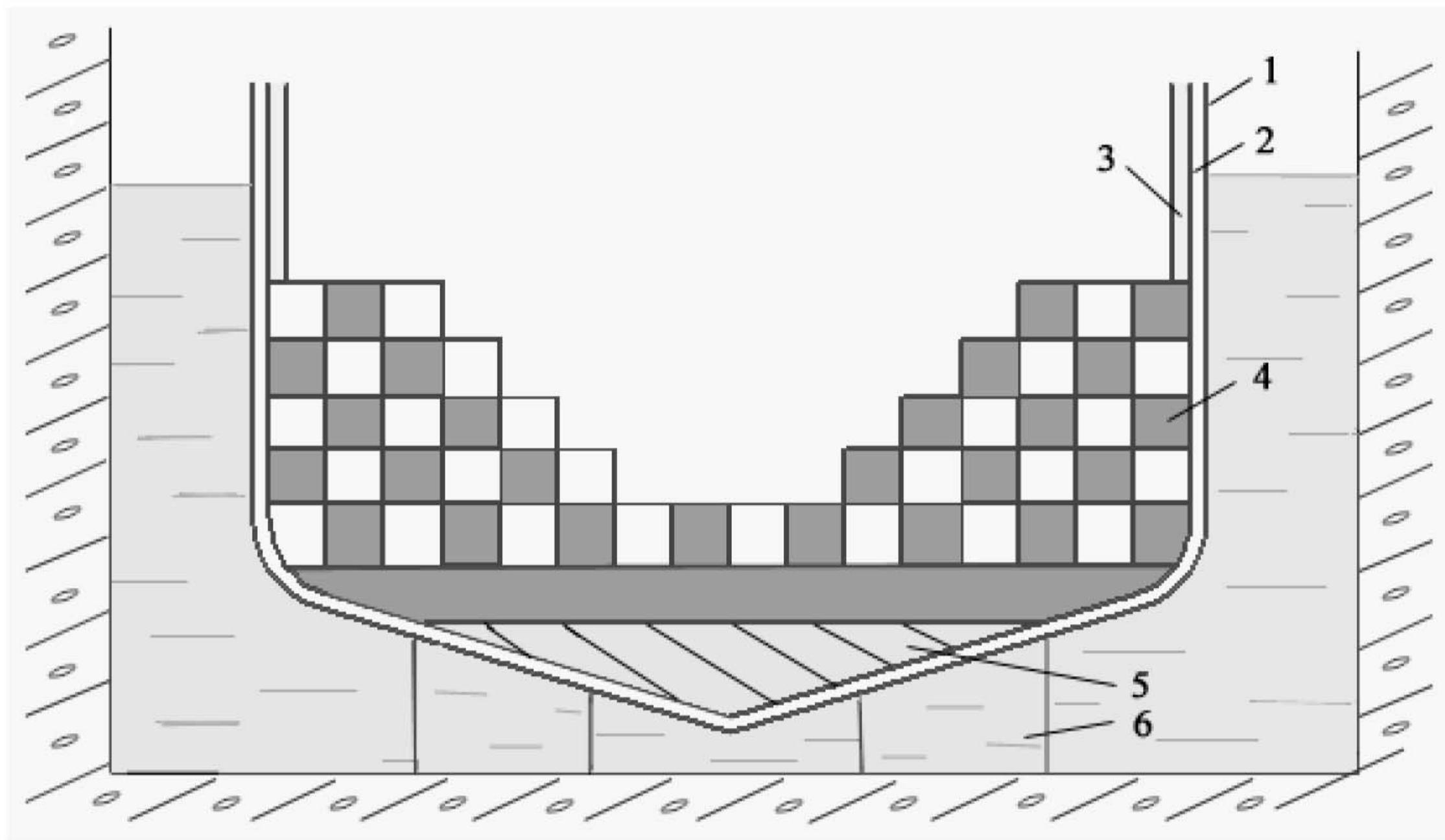
出典 B. R. Sehgal, *Nuclear Safety in Light Water Reactors: Severe Accident Phenomenology*, Academic Press, 2012.

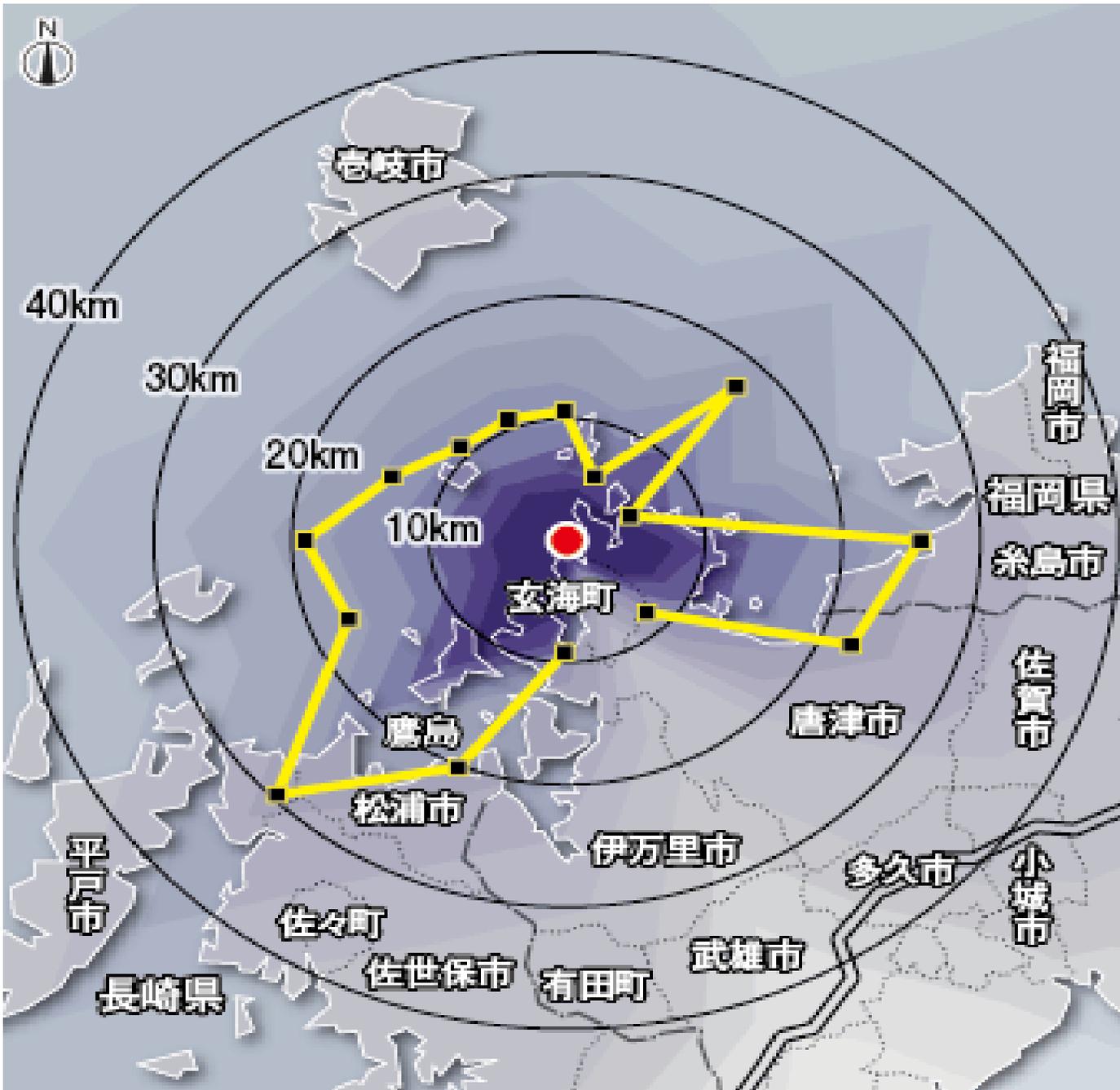
メルトダウンの発生時、ジルコニウムと犠牲材料に含まれる Fe_2O_3 とをテルミット反応させて水素の発生量を抑える。また、中性子吸収材とコリウムを反応させて、再臨界対策を行い、ホウ酸水を使用しないので、福島第一原発のような大量の汚染水は発生しない。



ロシアのVVER-1000のコア
キャッチャー。溶液拡散キャッ
チャ(欧州EPR)を使用せずに、
プレキャッチャーをるつぼ型に
し、るつぼの鋼鉄シェル周りを、
原子炉容器内保持(IVR)式に
小プール水蒸発冷却する設計。
(筆者注記)

出典 Saint Petersburg Institute
"ATOMENERGOPROEKTATOMENERGOPROEK
T" (JSC SPAEP) Main Features of Safety
Concept for Modern Design of NPP with
High Power VVER Reactors (AES-2006
Design for Leningrad NPP-2)

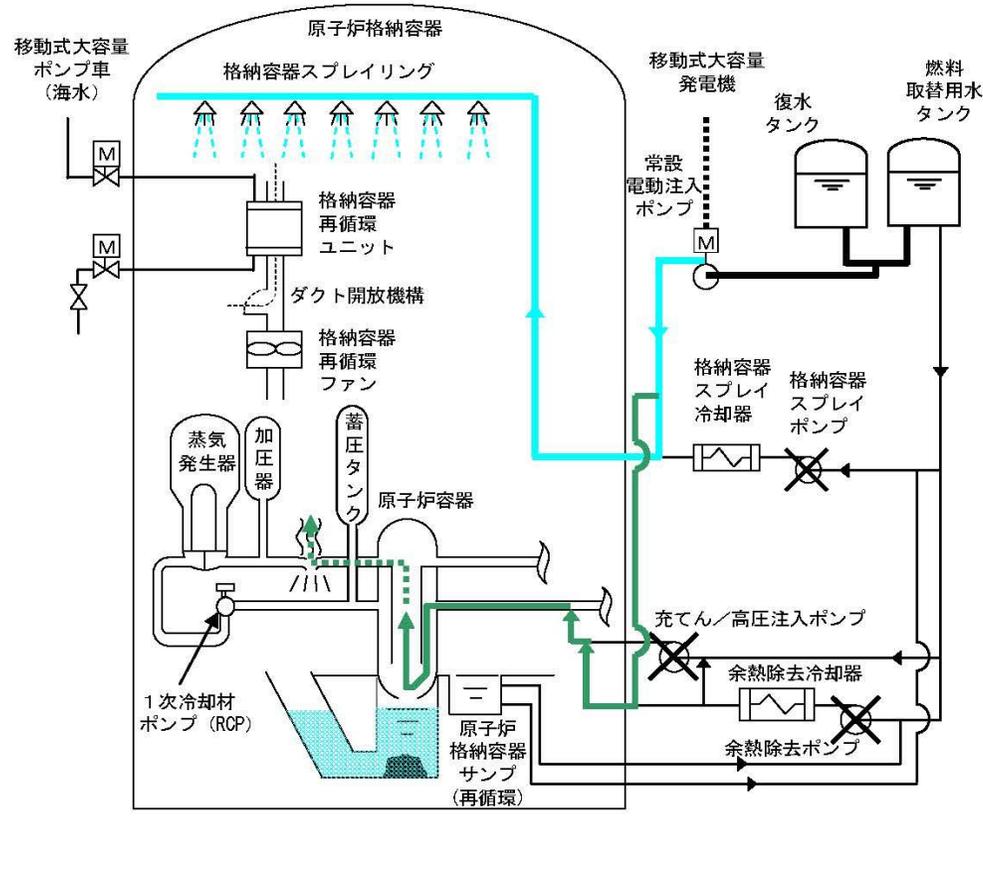




日本の旧基準では、福島クラスの事故は起こらないと決められていましたが、民主党政権下で発足したばかりの原子力規制委員会は、2012年10月にIAEA(国際原子力機関)の防護対策基準に照らして、福島クラスの事故は起こる可能性が有るとして、UPZ(緊急時防護措置準備区域)をおおむね半径30kmの範囲と決めました。

19. C/Vスプレイ注水（原子炉下部キャビティ水張り）を優先する理由

雰囲気圧力・温度による静的負荷 【大破断LOCA+ECCS注入失敗+格納容器スプレイ注入失敗】



炉心注入よりC/Vスプレイ注水を優先する理由

- 炉心損傷時は、格納容器破損防止対策の確実な実施が必要
- C/Vスプレイ注水することにより、原子炉下部キャビティに水張りをを行うとともに、原子炉格納容器の圧力上昇を抑えることができる。
- 炉心注入することにより、低温側配管に注入された注入水は炉心で崩壊熱を除去した後、蒸気となり高温側配管の破断口より放出されるため、原子炉格納容器の気層部へとどまり原子炉下部キャビティの水張りに寄与しにくいと考えられる。

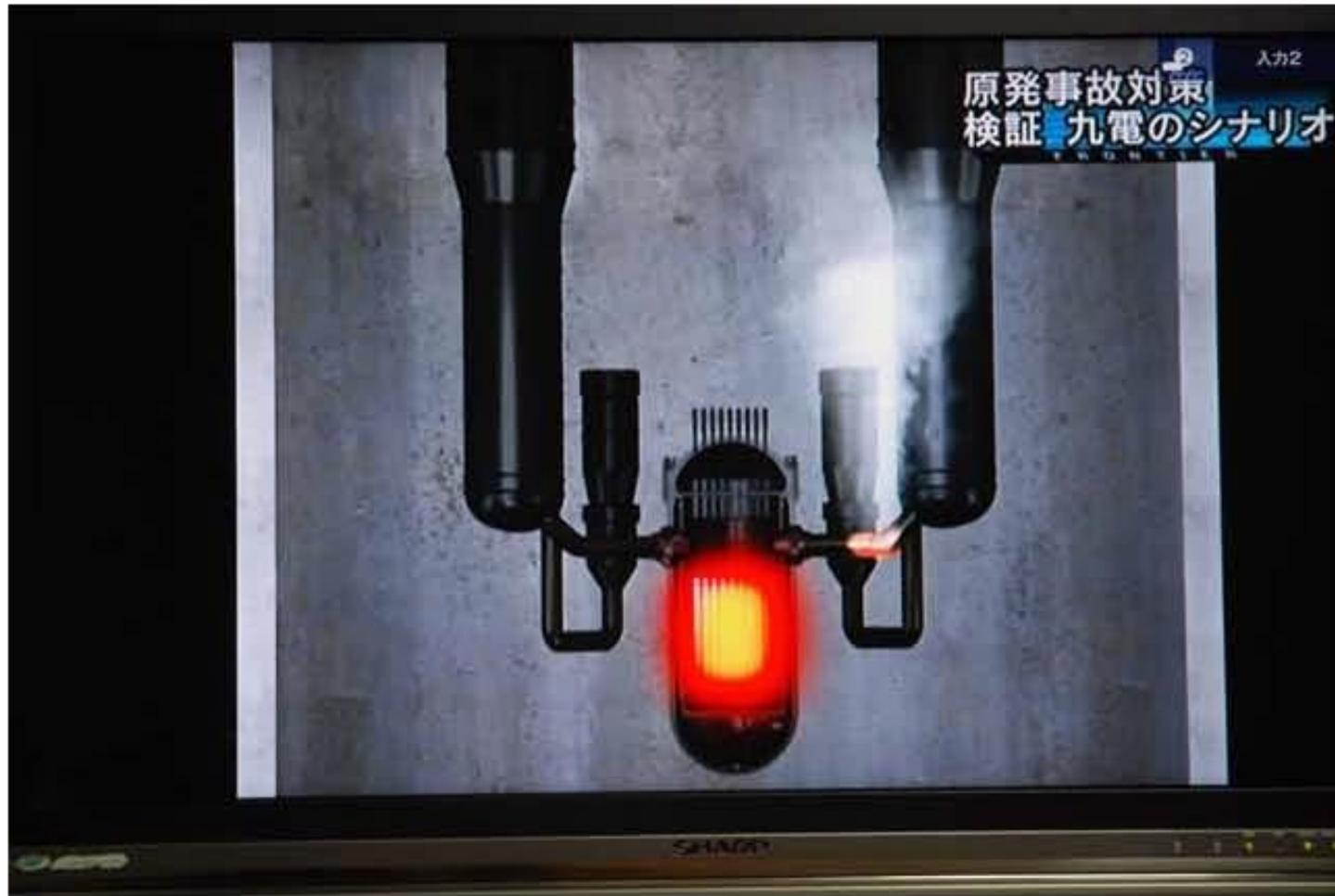
以上のことより、大破断LOCAが発生しECCSが注入できない場合は、常設電動注入ポンプによる炉心注入は行わず、常設電動注入ポンプを使用したC/Vスプレイ注水により原子炉下部キャビティへの水張りをを行い、確実に原子炉格納容器の健全性を確保する手段を選定している。

← C/Vスプレイ注入
← 炉心注入



九電がコアキャッチャーと同等という移動式大容量ポンプ車
九州電力ホームページより

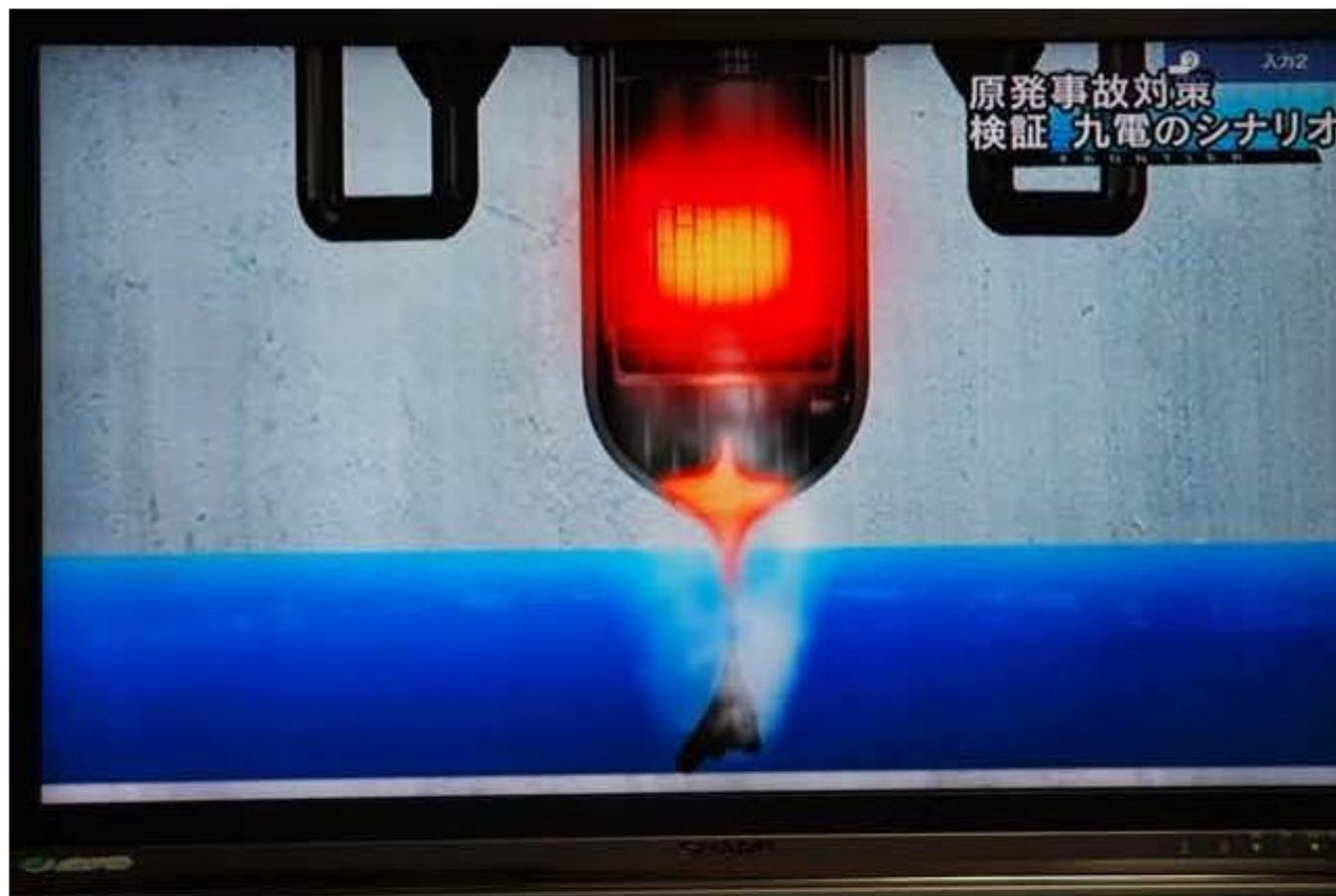
NHKが九州電力の過酷事故対策の問題を映像化



資料6 NHK「特報フロンティア」資料

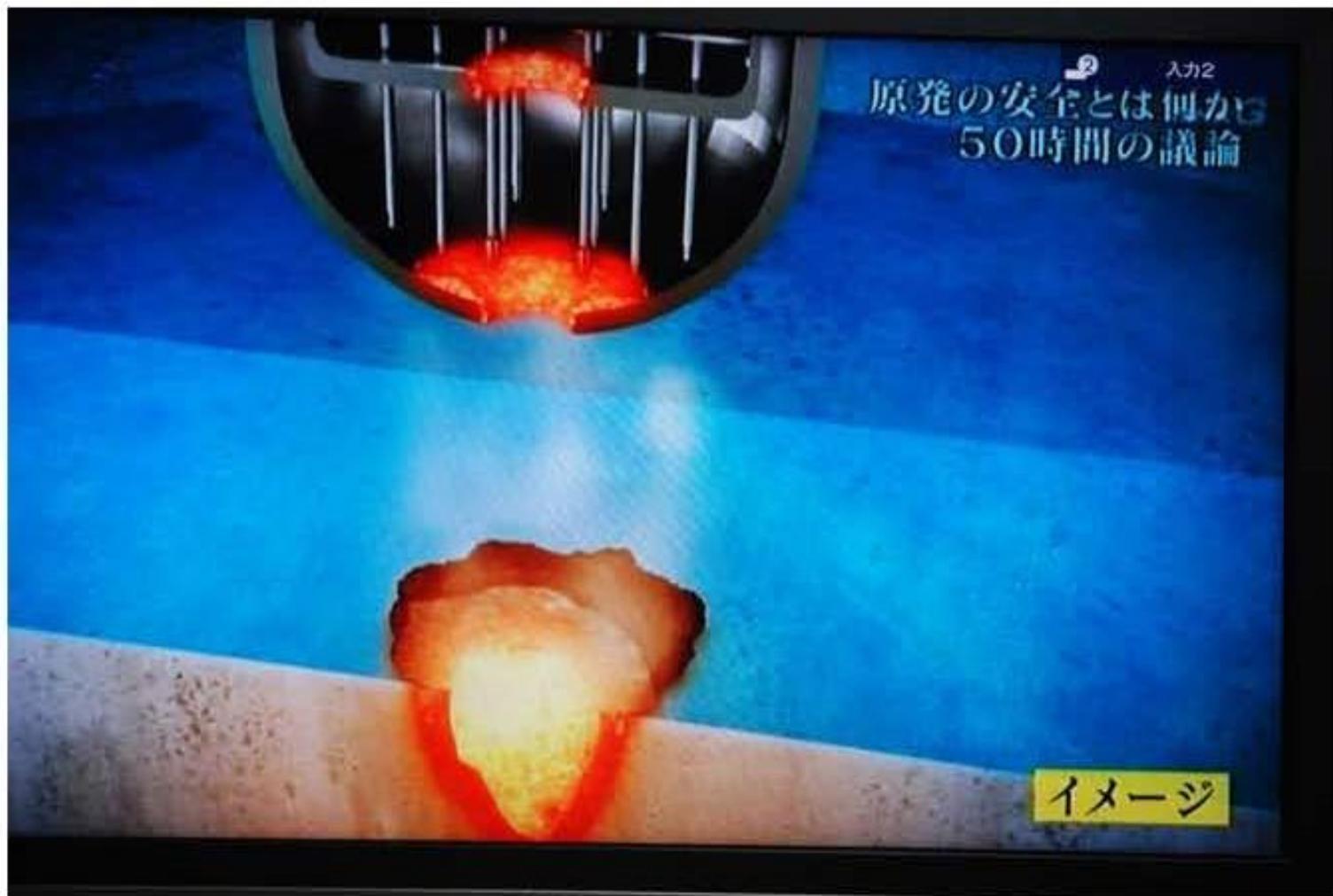
九電：この配管が地震で破断すると、冷却水噴出防止の手段が何も無いので

NHK福岡放送局制作 2013年9月20日放映



九電：緊急に原子炉格納容器に
大量の水を溜めて、溶融核燃料
を冷却します。

NHK福岡放送局制作 2013年9月20日放映

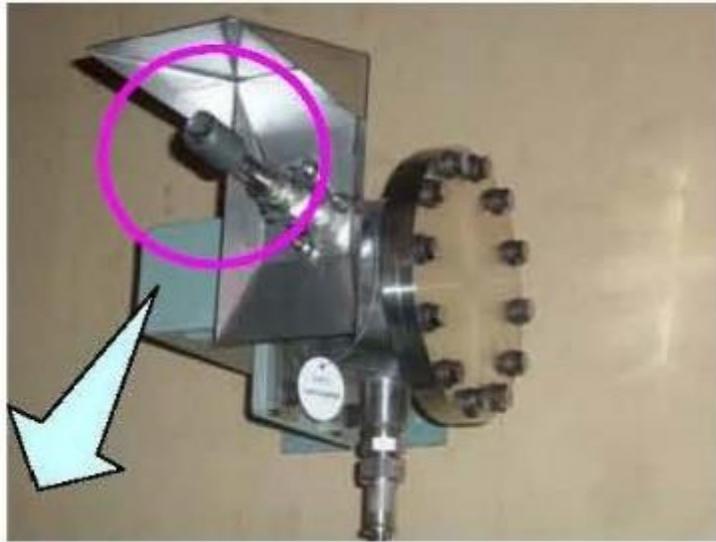


佐藤暁氏：水中でのコア-
コンクリート反応

NHK福岡放送局制作 2013年10月8日放映

九州電力

大規模な水蒸気爆発が 実機(格納容器)で
起こる可能性は十分に小さかろうと



九電が水素爆発対策に使用するイグナイター

水素爆発防止対策は、8月5日に行われた八幡浜市の伊方原発に関する住民説明会で5人の方が行った質問の内3人が水素爆発とイグナイターによる点火の事を質問されていました。この件について「イグナイターの点火タイミングはどうなっているか」との質問がありましたが、規制庁担当官は「水素は濃度の低いうちに運転員が判断して、点火し燃焼させます。」と答弁しています。しかし、水素濃度が4%以下だと着火しないが、4%以上に成ると一般には爆燃を起こし、13%以上に成ると爆轟を起こします。この当時市民には水蒸気爆発の事があまり知られていなかったのか、水蒸気爆発の問題は規制庁担当官も質問者も一言も発言されていません。

安倍政権に変わってから2013年7月の新規制基準では、原子力規制委員会は「新規制基準ができたので、日本の原発では過酷事故は起こりうるが、起きたとしても福島原発の過酷事故の放射能の飛散量の百分の一の事故が1炉につき100万年に1回しか起こらない」と改変しました。そして、九州電力は、原子炉設置変更許可申請書に、「もし万一川内原発の1、2号機に過酷事故が発生して100トンもの核燃料が2800°Cにもなり溶融し、メルトダウンが起きても、水素爆発も水蒸気爆発も起こらず、原子炉建屋から大気に放出されるセシウム137の量は最大でも5.6テラベクレで福島第一原発のセシウム137の放出量1万テラベクレルの1785分の一にしかない」と説明し、原子力規制委員会は新規制基準の適合性審査で承認しました。

3 重大事故の発生に備え新設した主な対策

3-7 重大事故時等の対策の有効性

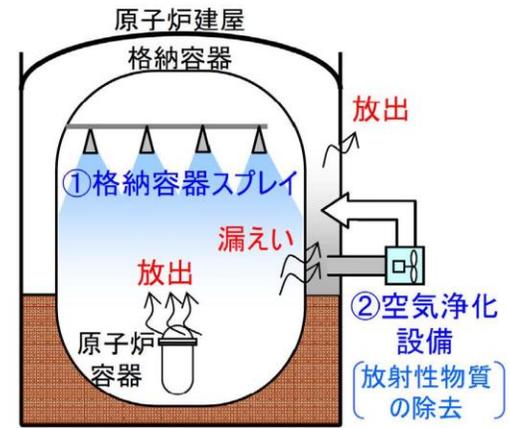
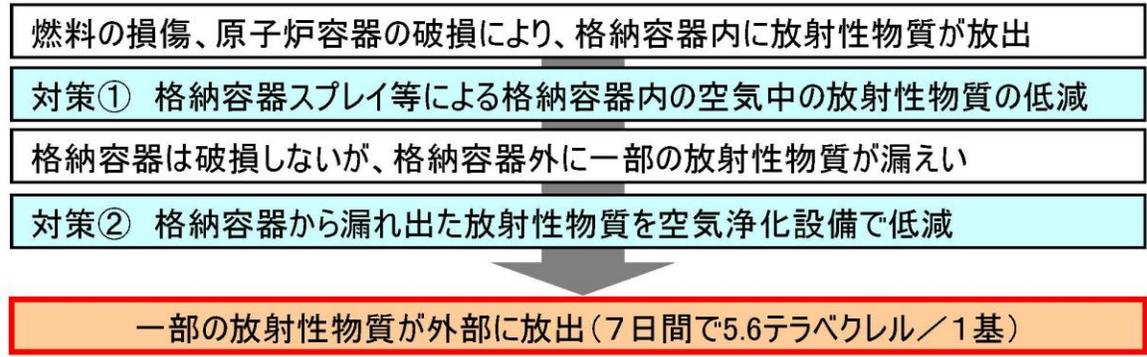
新たな設備や対策により、放射性物質の放出量は新規規制基準の制限値を大幅に下回ることが原子力規制委員会によって確認されました

- 新たに設置した設備や対策により、最も厳しい重大事故（炉心溶融が早く、格納容器内の圧力が高く推移するケース）※1が発生した場合でも格納容器は破損せず、放射性物質（セシウム137）の放出量は、7日間で1基あたり5.6テラベクレル（TBq）※2になることを評価し、原子力規制委員会によって確認されました
- この放出量は、新規規制基準の制限値100テラベクレルの約18分の1の水準です

※1 全ての交流電源がなくなるとともに、原子炉の冷却水が配管の破断により大量に漏れ出る事故事象

※2 1テラベクレル=1兆ベクレル、ベクレルの解説についてはP23参照

〔放射性物質の放出量の低減〕

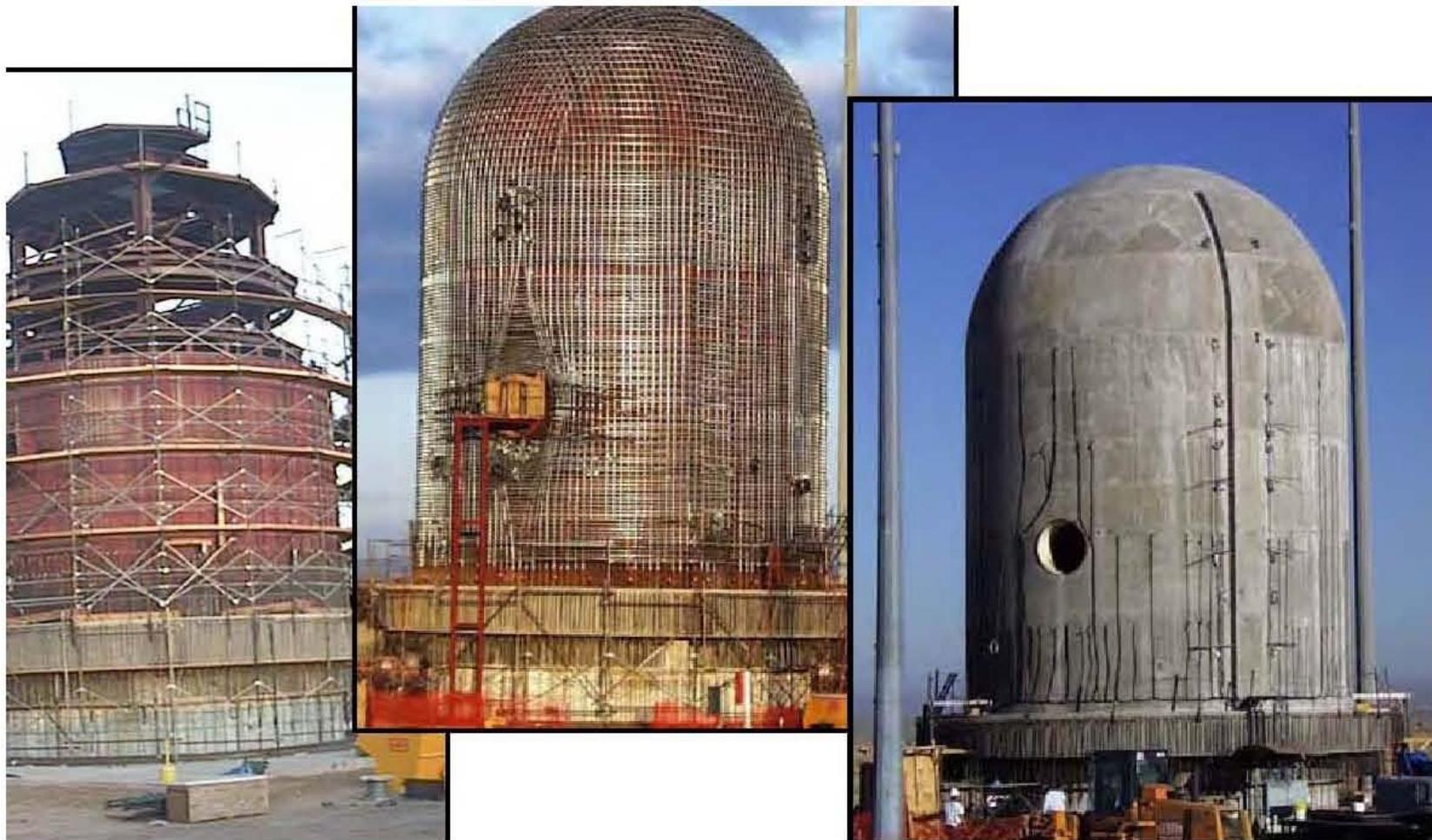


放射性物質の放出量の比較	新規規制基準の制限値（1基あたり）	約100TBq
	川内1、2号機の評価値（1基あたり）	5.6TBq 約18分の1
〔参考〕福島第一原子力発電所事故（全体）		約10,000TBq※3

※3 東京電力による評価

料7 サンディア研究所の加圧水型1 / 4モデルの破壊試験

圧カスパイクのモデル試験



圧カスパイクのモデル試験



原子炉格納容器内の水蒸気爆発の危険性

高島武雄[†] たかしま たけお
後藤政志[†] ごとう まさし

現在、原子力規制委員会において、原発の再稼働に向けて新規制基準への適合性審査が進められている。8月現在、設置変更許可申請書の審査が合格とされたものは九州電力川内原発1・2号機、関西電力高浜原発3・4号機および四国電力伊方原発3号機である。

加圧水型(PWR型)原子炉において、核燃料の冷却材が喪失して過酷事故(新規制基準では重大事故という)が発生した場合、格納容器下部キャビティに冷却水を供給して深さ1.3mのプールを作り、原

水蒸気爆発とは何か

図1は500 mLのビーカーに水を入れ、数十gの溶融ハンダを投入した時の水蒸気爆発の様子を示す。ビーカーが空中に飛び上がるほど激しい爆発現象が観察される。

通常的气体爆発は水素ガスなどの可燃性ガスが急激な燃焼により発生するものであるが、水蒸気爆発は燃焼のような化学反応ではなく、高温溶融



若松区藤ノ木2丁目のアルミメッキ加工会社「新興アルマー工業」の工場で9月1日に発生した爆発事故を受け、北九州市消防局は9月7日、溶解炉のある市内の全23事業所(計95施設)への一斉指導を始めた。

市消防局などによると、事故当時、現場の第1工場ではアルミニウムの溶解作業中で、漏出したアルミニウムと、付近にたまっていた水が接触し、水蒸気爆発が起きたとみられる。けが人はなかったが、同様の設備を持つ事業所に緊急指導することにした。

平成26年（ネ）第126号 大飯原発3, 4号機運転差止請求控訴事件

一審原告 松田正 外187名

一審被告 関西電力株式会社

控訴審第9準備書面

- 水蒸気爆発及び水素爆発の危険性 -

平成27年9月11日

名古屋高等裁判所金沢支部民事部第1部C1係 御中

一審原告ら訴訟代理人弁護士 佐藤辰弥

同 弁護士 笠原一浩

目次

第1 はじめに.....	4
--------------	---

まとめ

1979年3月28日にアメリカのスリーマイル島で過酷事故が発生し、続けて1986年4月26日に旧ソ連のチェノブイリで過酷事故が発生し、世界的には過酷事故が起きた場合の、緩和設計が重視されるようになった。

チェルノブイリ原発は格納容器が無く、爆轟で溶融核燃料が野ざらしになり、520万テラベクレルの放射性物質放出されたといわれている。

日本では過酷事故は起こらないと考え続けられてきたので、十分な対策は行われなかった。ところが、2011年3月11日に福島第一原発で過酷事故が起こり、原発の再稼働の為に、過酷事故対策が必要になり、新しく設置された原子力規制委員会により、過酷事故対策を行ったという新規制基準が策定された。しかし、日本では福島第一原発でメルトダウン対策が発生しても、その緩和対策や汚染水対策に、スリーマイル島やチェノブイリで行われた対策を参考にしなかった。また新規制基準にも、海外の新規制基準を参考にしなかった。

ロシアのカベンスキーの「VVER-1000のシビアアクシデントマネジメント概念とるつぼ型コアキャッチャにおけるコリウム保持の有効性」の論文が発表されたのは2009年4月14日で福島の大事故の約2年前である。日本の関係者がこの論文を真剣に読んだり、海外の新規制基準を真剣に検討していれば、水蒸気爆発や大量の汚染水の発生は無かったものと思われる。しかし、新規制基準を策定し、新規制基準に係わる適合性審査に合格し、川内原発1、2号機が既に稼働しているというのに、いまだに海外の重要な論文や海外の新規制基準が検討されていない。これは、福島原発にガス爆発は起きたが、水蒸気爆発が起きなかったためとおもわれる。しかし、最近高島武雄氏、後藤政志氏の「原子炉格納容器内の水蒸気爆発の危険性」が発表され、10月8日の福井地裁の関西電力高浜原発3、4号機の再稼働差し止めを命じた仮処分決定の不服裁判の準備書面で、「水蒸気爆発及び水素爆発の危険性」として全面的に争われるようになり、やっと一部で知られるようになってきた。

衝撃を伴う水蒸気爆発

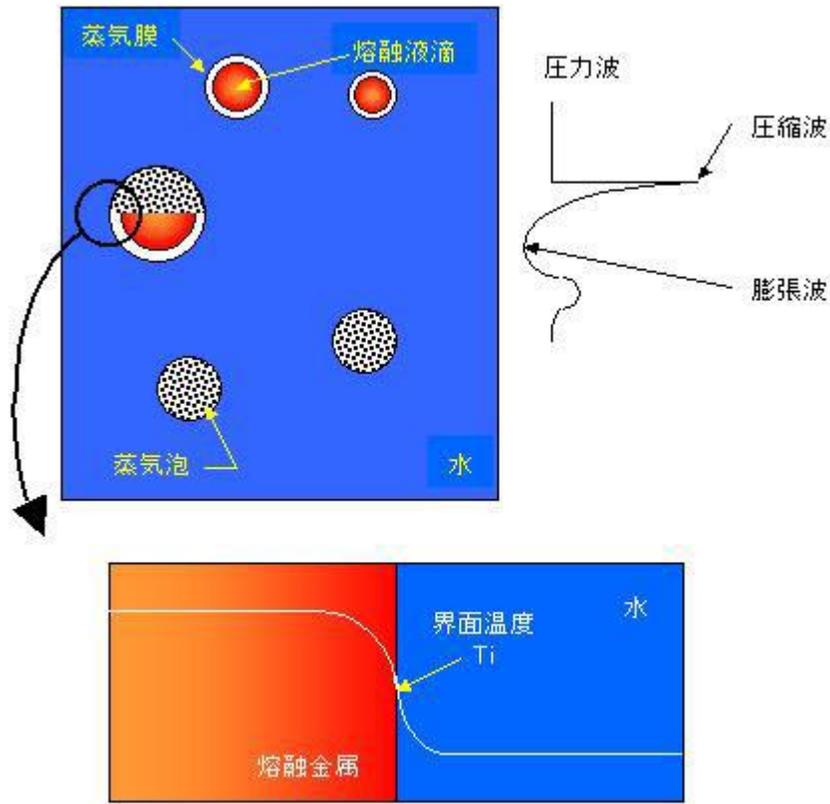


図4 自発核生成モデルの概念図

出典 筑波大学水蒸気無爆発の研究より

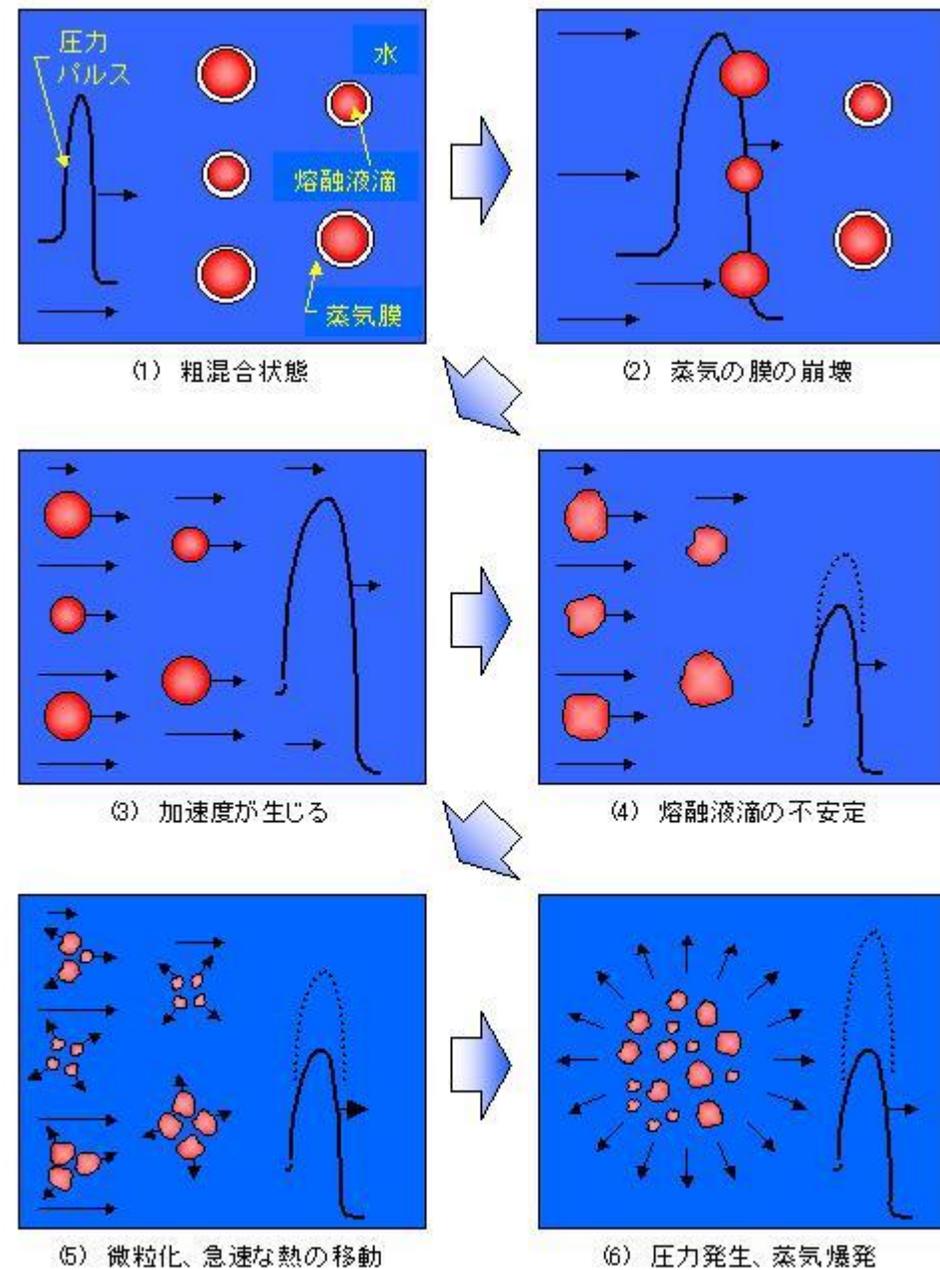
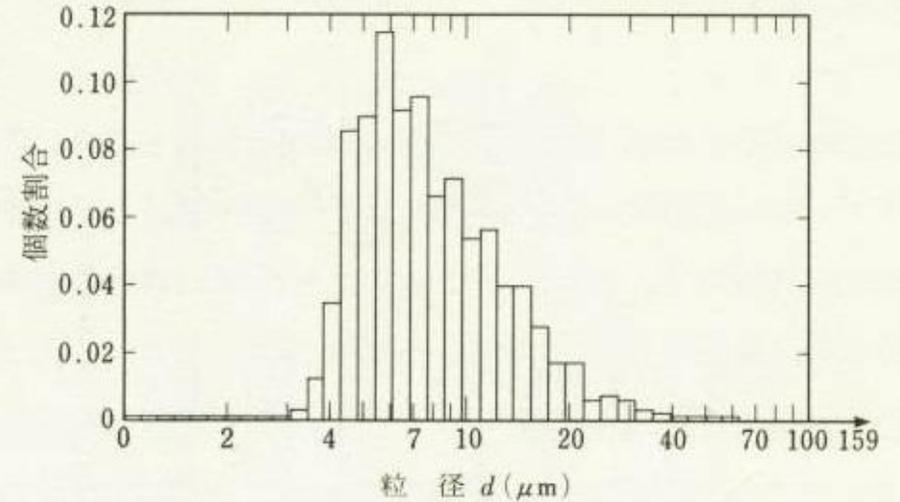


図5 熱的デトネーションモデルの概念図

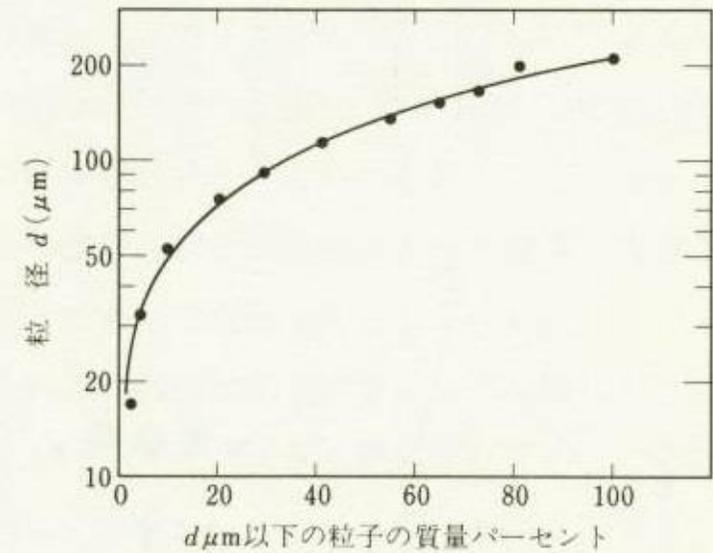
細粒化過程のメカニズム 低温液はどんどん蒸発が進んで蒸気泡を形成するが、**高温液の方は蒸発することがないため、吹き飛ばされるようになって細かい粒になり固化する。**これが**細粒化**と呼ばれる現象である。**蒸気爆発には高温液の細粒化が必ず伴うことが確認されているが、そのメカニズムはよくわかっていない。**

細粒化のメカニズムを考える前に、**蒸気爆発によってどの程度細粒化するのかを**みてみる。蒸気爆発の後に回収された微粒子をふるいにかけてみると図6・4のようになる。(a)はこの微粒子の粒径分布を表し、直径 $d \mu\text{m}$ の粒子の個数が全体の個数に占める割合を示している。**約 $5 \mu\text{m}$ の粒子の個数が最も多いことがわかる。**

酸化鉄をレーザーで溶かして、水槽に落下して、水中放電で発生した圧力波でトリガーを加え蒸気爆発させた後、粒子を回収してその粒径分布を調べたもの。

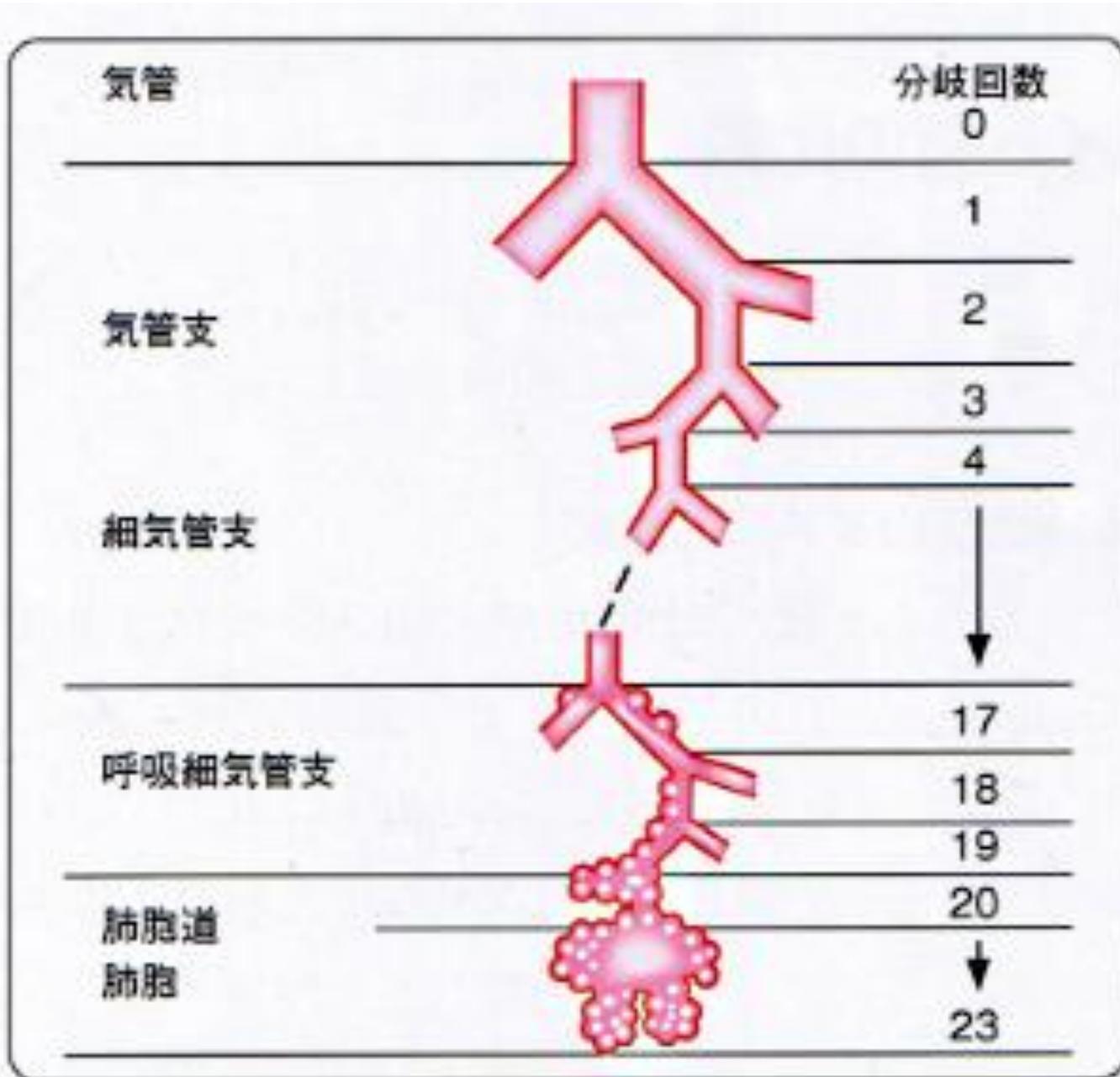


(a) 粒径分布



(b) 粒子の積算した質量割合

図 6・4 蒸気爆発の後に回収された微粒子の分析結果



水蒸気爆発で大気に飛散した超微粒子のコリウムを肺に吸い込んだらどうなるのかが疑問です。