

再臨界の可能性について

要旨

- 再臨界の可能性についての審査が不十分と考えられる。
- 玄海原発の事故対策は再臨界を引き起こす恐れがある。
- 再臨界で水蒸気爆発が発生する可能性があるか未検証。

※再臨界（Recriticality）とは「臨界状態の原子炉が停止するなどして、核分裂が止まる未臨界状態になった後に、再び臨界状態になること（注1）」である。

1. 再臨界の可能性について

原子力発電は臨界状態（核分裂の連鎖反応が一定の割合で継続している状態）を、人工的に発生させて管理することにより成り立っている。具体的には、核燃料（ウランやプルトニウム）の核分裂反応を、制御棒やほう酸水などを使って（反応に関わる中性子の量や速度などを）制御して臨界状態にする。

しかし、想定外の状況で臨界状態になる事故（臨界事故）が世界中で数多く発生している（注2）。臨界事故は国内では1999年に茨城県東海村で起きた「JCO臨界事故」で多くの死傷者が発生したが、実は沸騰水型原発の制御棒引き抜け事故でも、(当初秘密にされた)多くの臨界事故が起きていた（注3）。

玄海原発の審査でも臨界事故を防止するための対策が検討されたが、既に判明している福島原発事故後の研究で得られた、臨界状態になる新たな条件（注4）などを踏まえた検討が不十分である。なお、設置法の参議院決議文（二十三）は「最新の科学的・技術的知見」を基本に規制することを求めている。

なお、再臨界の可能性は福島原発の事故直後から指摘された問題でもあり（注5）、福島原発廃炉作業に伴う再臨界の研究・実験と対策が進められている（注6）。そして、佐賀県の設置した「佐賀県原子力安全専門部会」の第一回会合（昨年12月27日開催）でも、「再臨界について」の質疑がなされた（注7）。

ちなみに、玄海原発を作った三菱重工業は福島原発事故前の出願で、メルトスルー後の「再臨界」を防ぐ方式を提案した（注8）。この対策が有効かは疑問だが原発の設計者らは「再臨界の可能性」を認識している。原発は、どのような状況であっても、臨界状態を厳重に監理することが至上命題なのである。

2. 再臨界の可能性があるとされる理由

玄海原発でメルトスルー（meltdown：溶けた核燃料などが原子炉容器を貫通）した場合、事故後に貯めた大量の水の中に、溶け落ちる大量の核燃料などを受け止める対策が認可されている。この対策は、水の核燃料などを冷やす効果に期待してのものと思われるが、水蒸気爆発の危険性が指摘されている。

加えて、水は核分裂反応に関係する中性子を減速する（中性子の減速材）。原発（軽水炉）では水を、熱を伝える目的以外に減速材としても使い、減速された中性子（熱中性子）はウランなどに吸収されやすくなって核分裂反応を促進する。福島原発事故の解析でも水が再臨界の可能性を高めている（注9）。

審査では「ほう酸水（ホウ素）」の中性子を吸収する効果で、（核分裂反応を抑制し）再臨界を防止できる可能性が高いと考えていると思われる（注10）。しかし、溶けた核燃料などがコンクリートを溶かして混ざった場合、必要になるホウ素濃度が高くなり過ぎて現実的でないことが判明している（注11）。

そもそも、非常時に使える「ほう酸水」の量に限りがあるし、福島原発事故の場合の様に地下水が浸入する恐れもある（注12）。最終的には福島原発の様に海水を入れることを検討しているが、海水の臨界

資料（４）

防止効果は低い（注１３）。よって、保守的に「水」を前提として再臨界の可能性を考えるべきである。

また、福島原発事故の廃炉作業に伴う研究によって、再臨界の可能性が高い状況が指摘されている。それは、原子炉から落ちて積もっていた核燃料などの上に、メルトスルーしたが原子炉にぶら下がっていた核燃料などが落ちて、（ウランなどの量が一気に増えるなど）再臨界の可能性が高まる状況である。

実際、玄海原発の原子炉には多くの貫通部があり、多くのケーブルが垂れ下がっている（注１４）。そのため、複数箇所からメルトスルーしたり、原子炉に固化した核燃料などが垂れ下がるかもしれない。それが、溶け落ちた核燃料などが水に入って生じる、圧力スパイクなどの影響で落下する恐れがある。

3. 再臨界による影響は未知数

そもそも、原発の設計現場ではメルトスルーしたら再臨界を心配するのは当然との認識だったようだ。しかし、メルトスルーした後に再臨界するか確かめる実験は、危険過ぎて簡単には出来ないし、解析するにもパラメーターが多過ぎて手に負えないため、具体化できる安全対策を検討できなかったらしい。

確かに、核燃料（ウランやプルトニウム）以外の原子炉内の物が混ざり、コンクリートや（水を貯める過程で流れてくる可能性のある）保温材などに、海水を入れれば多様な物質が混入してしまう。これら形状が不規則で多様な物質が溶け込んだ核物質の、再臨界に関する解析は極めて困難である（注１５）。

それでも、これまでに起きた臨界事故の報告などから考察するに、再臨界になった時に核燃料などの内部などが高温の液体状であった場合、水蒸気爆発を引き起こす可能性がありえる。多くの（溶液状の核燃料による）臨界事故では、瞬間的に（即発臨界による）発生エネルギーの強い高まりが生じている。

即発臨界とは核分裂による中性子（即発中性子）だけで、核分裂の連鎖反応が続く危険な状態である（原発は核分裂の少し後に発生する遅発中性子を活用して安定的な制御を実現）。しかし、水に落とした熔融炉心の再臨界に関する解析や実験はないようなので、即発臨界の可能性がどの程度か不明である。

発生した再臨界が穏やかなものだった場合でも、溶け落ちて山になった堆積物の温度が徐々に上昇し、内部が高温の液体状になっていくかもしれない。それは床のコンクリートを溶かして大量のガスを発生させる（ガスは核分裂によって生じる物質からも発生する）。この発生したガスは内部にたまっていく。

それというのも、水中で山となった堆積物の周囲は水で冷やされて硬い外皮（クラスト）が出来ると考えられている。よって、内部などで発生したガスはクラスト内部にたまる場合が予想される。しかし、再臨界で温度が上昇してクラストが内部から溶かされて薄くなれば、クラストが破れてガスが放出する。

そうすると、冷たい水がどっとクラストの中に侵入するが、水は優れた減速材であり冷却材である。実は、核物質は冷やされると密度が高まる関係で臨界しやすくなる（密度効果）。そのため、二重の効果で水の侵入は核分裂を促進するかもしれない。こうした状況で高温の液体に低温の水が浸入するのだ。

この様な状況だけでも水蒸気爆発を引き起こす可能性があると思われるが、（前述した様な）原子炉に垂れ下がっていた核燃料などの落下がクラストを破壊すれば、より危険な展開になることが予想される。しかし、再臨界について不確定なことや解明されていないことが多過ぎ、これ以上の推測は困難である。

そもそも、福島原発の内部や事故の経過が完全に解明されていれば、これら再臨界の可能性と影響についても、はるかに明確で現実的な推測や判断ができた可能性が高い。よって、福島原発事故の詳細が分からないのに、メルトスルーした後の事故対策が出来ると考えることが「危険な間違い」なのである。

以上、玄海原発の再臨界に関する審査は、設置法の第一条に明記された「原子力利用における事故の発生を常に想定し、その防止に最善かつ最大の努力をしなければならない」との目的に違反している。

資料（４）

（注１）

再臨界とは | エネ百科 | きみと未来と。

<http://www.ene100.jp/%E5%86%8D%E8%87%A%E7%95%8C%E3%81%A%E3%81%AF>

（注２）

世界の原子力施設における臨界事故 (04-10-03-05) - ATOMICA -

世界の核燃料施設における臨界事故 (04-10-03-02) - ATOMICA -

海外の核燃料施設における臨界事故の原因分析（渡辺憲夫）

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesj1959/42/11/42_11_1204/_article/-char/ja/

（注３）

BWR臨界事故と日本の原子力安全文化（小林圭二）

<http://www.rrri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/seminar/No103/kobayashi.pdf>

沸騰水型原発（BWR）に制御棒引き抜け事故が多発していた

<http://www.priee.org/chikyugo/pdf/325/p0809.pdf>

原子力発電所の制御棒脱落事故隠蔽問題に関する意見書

http://www.nichibenren.or.jp/library/ja/opinion/report/data/070823_6.pdf

（注４）

福島第一原子力発電所燃料デブリ臨界管理に資する基礎臨界データ整備に向けて

https://www.jaea.go.jp/04/anzen/archives_seikahoukoku/h26/H26PosterCritical.pdf

（３頁より一部転載）燃料デブリが格納容器のコンクリート床に落下していると考えられる。このため熔融炉心コンクリート相互作用（MCCI）生成物（コンクリートとウラン酸化物の単純な混合物も包含）の臨界特性を評価した。

ケイ素を主成分とするコンクリートは、中性子吸収が少なく、水には劣るが中性子減速効果も持つ。このため、MCCI 生成物がごく少量の水分と共存すると臨界になり得ることが示された。

（この資料の元論文↓）

Infinite multiplication factor of low-enriched UO₂-concrete system

低濃縮 UO₂-コンクリート系の無限増倍率

<http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/search/servlet/search?5036965>

（注５）

「デブリの再臨界」菅直人ブログ <http://ameblo.jp/n-kan-blog/entry-12046148246.html>

（一部転載）

実は 2011 年 3 月 12 日の 18 時ごろからの関係者の協議の時、私が斑目原子力委員長に 1 号機の「再臨界」の可能性について聞いたことがある。それはメルトダウンした核燃料、つまりデブリが圧力容器の底を突き抜けて格納容器の底に落ちてたまった時に、形状によっては再臨界を起こす可能性がある、外部の専門家から聞いていたから、質問したのだ。斑目委員長は「可能性はゼロではない」と答えた。

資料（４）

（注 6）

日本原子力研究開発機構による福島原発デブリの再臨界等に関する研究成果が以下リンクにある。

<https://fukushima.jaea.go.jp/about/seika.html>

（注 7）

昨年 12 月 27 日に開催された佐賀県の設置した「佐賀県原子力安全専門部会」の第一回会合で、「再臨界について」以下の質疑があった。（転載開始 ※委員の所属・専門分野を加筆）

○出光委員（九州大学大学院工学研究院 教授 原子力工学（核燃料工学））

シナリオによりますと、大体 4 時間後に全ての燃料がキャビティ部に落下するということになっておりますが、ちょっとこのシナリオの中には書いていないんですが、再臨界についてはどのような考え方になっているのか、教えていただけますか。

○九州電力（梶原本部放射線安全グループ長）

ちょっとこの事象かどうか忘れましたが、一応、溶融燃料の未臨界性というのはちょっと今、ここでは手持ちのデータがないんですけども、確認してございます。

○出光委員

再臨界の可能性はないということでもよろしゅうございますか。

○九州電力（梶原本部放射線安全グループ長）

はい。再臨界の可能性はないと考えてございます。

○出光委員

あと追加で教えていただきたいんですが、これを冷却するときには、今のところ純水で考えられているとの理解でよろしいですか。ほう酸水をまぜるといようなことは、特には今考えていないということでもよろしいですか。

○九州電力（梶原本部放射線安全グループ長）

最初は RWS T が働くときはほう酸水でございますが、最終的には冷却というのが優先されますので、海水までを使うと。優先度はちょっとありますが、最終的には海水を入れるということで評価してございます。そのときにも塩の析出による影響とかも評価して実施可能であるという見通しは得てございます。（転載終わり、以下リンクの「第 1 回佐賀県原子力安全専門部会議事録」48,49 頁より引用）

http://www.pref.saga.lg.jp/kiji00352941/3_52941_34072_up_r05oivoo.pdf

なお、キャビティ（cavity）については以下リンクの、「玄海原子力発電所 3 号炉及び 4 号炉 重大事故等対策の有効性評価に係る補足説明資料」の「添 3.5.3-7（129 頁）」に説明があり、次頁に右に転載した図などがある。

<https://www.nsr.go.jp/data/000151762.pdf>

RWS T (Refueling Water Storage Tank) については、「用語・略語リスト（以下リンク）」に以下の説明がある。



図 2.1.7 原子炉下部キャビティ室構造体

資料（４）

http://www.pref.saga.lg.jp/kiji00352941/3_52941_34073_up_27v1doqj.pdf

「燃料取替用水タンクの略語。原子炉から燃料を使用済燃料ピットへ取り出したり、再び原子炉へ装荷したりするときに使う水を貯めるタンク。事故時には、炉心（燃料）を冷却するための水源となる。」

上記内容に出てくる「熔融燃料の未臨界性に関する確認内容」について九州電力に質問したところ、以下の回答が本年４月５日にメールで送付された。

（以下、回答本文を転載）

ご質問いただきました内容について、下記URLの新規制基準適合性審査に関する事業者ヒアリング（玄海3・4号機）（その12）」の「資料108」のページ「添3.1.2.11-1 炉心部に残存する損傷燃料の冷却について」を参照ください。

https://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/tekigousei/power_plants/genkai34/meeting/index.html

（転載終わり）

「資料108（<https://www.nsr.go.jp/data/000176076.pdf>）」を確認したところ、「添3.1.2.11-5（138頁）」に以下の記載があった（なんと、本資料は玄海原発の設置変更申請の認可日に提出されていた！）。

（転載始め）

（２）冷却操作実施時に想定される設備への影響

原子炉容器内残存した熔融炉心の冷却のためCV内への注水を実施した場合に考えられる影響と評価を次頁の表のとおり整理した。

a. 臨界性

冠水している残存した熔融炉心については、冠水させている水が、ほう酸水と海水の混合水であり、ほう素濃度が十分確保できている状態では臨界に至る可能性は低い。なお、海水にはほう素濃度換算で200ppm程度の中性子吸収効果が見込まれる。

露出している残存した熔融炉心については、減速材不足のため臨界に至る可能性は低い。仮に熔融燃料中に冷却材が侵入し、中性子の最適減速条件が形成されることを想定した場合は臨界に至ることが考えられるが、炉心形状の崩壊などの要因も考慮すると、その可能性は低いものとする。

以上のように熔融炉心が臨界になる可能性は低いものの、熔融の形態が特定できないことから、熔融炉心が無制御な臨界状態に至る可能性をできる限り少なくするため、注水にあたっては可能な限りほう酸水を用いる。

なお、炉心の臨界状態は、モニタリングポスト、CV内サンプリングによる核分裂性希ガス濃度の測定等により行うこととなる。（転載終わり）

上記のCV(Containment Vessel)については、前記「用語・略語リスト」に以下の説明がある。

格納容器の略語。燃料が収められた原子炉容器や蒸気発生器など、重要な機器を覆っている容器

この九州電力の回答によれば出水委員の質問に、九州電力（島笠発電本部放射線安全グループ長）は「熔融燃料の臨界性について」間違った回答をしたことになる。出水委員の質問は「原子炉容器内に残存した熔融炉心」ではなく、「キャビティに落下した（熔融炉心）」の再臨界（臨界性）についてである。

そのため、「キャビティで冠水したデブリの臨界性の確認の有無、確認していない場合の理由、確認した場合は公開の有無と入手方法、定量的な臨界性の確認をしたか、この資料より以前に臨界性に関する確認資料を審査機関に提出したか」の5つの再質問を4月5日にしたが、4月16日時点で回答はない。

資料（４）

（注８）

「再臨界の可能性」は原発メーカー三菱重工業の出願書類にも明記されている。

以下に三菱重工の出願内容を一部転載するが、添付図面の構造は玄海原発のものともそっくりである。

（転載開始）「緊急炉心冷却装置が故障した場合には、炉心を冷却することができず、炉心が溶解して、溶解した燃料などの溶融物が原子炉容器を破壊する。原子炉容器を破壊した溶融物は、原子炉容器の下部を貫通して冷媒が貯蔵されているキャビティに落下して冷却される（例えば、特許文献１）。

特許第３５３７４４４号公報 しかしながら、特許文献１に開示されている発明では、溶融物が山状に堆積した場合には、溶融物を十分に冷却することができず溶融物が再臨界を引き起こす危険性があった。」

（上記出願 WO2011104908 A1 のリンク）

<http://www.google.com.tr/patents/WO2011104908A1?hl=ja&cl=ja>

（引用された特許３５３７４４４のリンク）

https://www.j-platpat.inpit.go.jp/web/PU/JPA_H11503234/F493846A7E66FEF166CBC462D1EED3B4

（転載終わり）

詳細は上記出願内容などをご覧いただければわかる通り、キャビティに階段状の構造物を設けて小分けして溶融炉心を受け止める対策を考えている（再臨界を防げるし早く冷却できると考えたと思われる）。

（注９）

「再臨界について」炉物理の研究 第 64 号（2012 年 3 月）京都大学原子炉実験所 中島 健

http://rpg.jaea.go.jp/else/rpd/annual_report/pdf64/No64-5.pdf

（４頁より一部転載）溶融した燃料が压力容器底部等において、大きな軽石のような多孔質岩石状に固まり、そこへ水が浸入するという場合に、臨界となる可能性があると考えられる。

（注１０）

「第 56 回原子力規制委員会」資料 1 の 46 頁より抜粋）<https://www.nsr.go.jp/data/000175362.pdf>

（意見の概要）九州電力は、炉心溶融物とコンクリートの反応で水素が発生する対策として、原子炉下部キャビティに水を貯めるとある。この対策では炉心溶融物が大量の水と接することで、水蒸気爆発事故になる危険性がある。模擬燃料を使った実験によると、溶け落ちた炉心溶融物は水に接すると粒子状・軽石状になり、コンクリートの床に降り積もる場合が想定される。そして、国内外の専門家による解析によると、炉心溶融物はコンクリートを溶かしながら、内側に取り込んだ水やコンクリートの効果で臨界に至る可能性がある。その場合、炉心溶融物は臨界で発生した熱などによって、急激に膨張し飛び散る危険性がある。その大量の細かく飛び散った高温溶融物は、直接・瞬間的に大量の水と大きな表面積で接して、大量の水蒸気が急激に水中で爆発的に発生する。すなわち、再臨界は水蒸気爆発のトリガー（外乱）になりうる要素になるのではないかと。

（考え方）形状が失われ、ほう酸水が注入された状態において、炉心溶融物が臨界に至ることは考えがたいと判断しています。仮に再臨界が起こったとしても、そのエネルギーは崩壊熱に比べて十分小さいため、問題とはならないと判断しています。（転載終わり）

問題とすべきは再臨界で発生するエネルギーの量もあるが、水蒸気爆発の引き金になる形状的な変化などが起きるかどうか重要である。そもそも、発生エネルギーの定量的な確認をしたのか疑わしい。

資料（４）

（注１１）

原子力規制庁平成 26 年度原子力施設の臨界管理安全基盤強化委託費事業報告書

<https://www.nsr.go.jp/data/000175836.pdf>

（34 頁より一部転載）解析結果—水中のホウ素有り

MCCI 生成物の未臨界を担保する手法の 1 つとして水に中性子毒物のホウ素を添加することを想定し、必要濃度の目安として $k_{\infty} = 1$ となる濃度を評価した。計算モデルは図 3-3 に示す非均質体系であり、ホウ素を MCCI 球を取囲む水の部分にのみ含ませた。用いた計算コードは SRAC-PIJ である。解析結果を表 3-9 (1)~(4) 及び図 3-5 (1)~(4) に示す。

UO₂ の場合、表 3-9 (1)~(3) 及び図 3-5 (1)~(3) に見られるように、MCCI 生成物中のコンクリート体積割合が 0%~40% の範囲では、 $k_{\infty} = 1$ となる最小ホウ素濃度はほぼ一定となる。235U 濃縮度 5 wt% の場合 17,000ppm、同 4 wt% の場合 10,000ppm、同 3 wt% の場合 6,000 ppm となった。しかし、コンクリート体積割合が増大するにつれ、 V_m/V_f が小さい領域、すなわち自由に流れる水が極端に少なく、コンクリート中の水分が主に中性子を減速している条件では、必要なホウ素濃度が増大し非現実的な値となる。

燃焼燃料の場合、表 3-9 (4) 及び図 3-5 (4) に見られるように、コンクリート体積割合が 80%程度までは、 $k_{\infty} = 1$ となる最小ホウ素濃度は 4,000ppm 程度となる。但しコンクリート体積割合が 90%では 16,000ppm となる。（転載終わり）

k_{∞} は無限増倍率のことで（下記リンクの解説によると） k が 1 の時に臨界、1 を超える時に臨界超過、1 に満たない時に臨界未満となる。有限な体系では必ず中性子の漏れがあるので、体系が臨界となるためには無限増倍率 k_{∞} は 1 を超えていることが不可欠である。

http://www.rist.or.jp/atomica/dic/dic_detail.php?Dic_Key=1922

以下資料（7 頁）には、玄海原発のほう酸タンクのほう酸濃度は 7,000ppm 以上、燃料取替用水タンク（ピット）は 3,100ppm 以上との記載がある。<https://www.nsr.go.jp/data/000034726.pdf>

よって、コンクリートとの混合が進んだ場合、ほう酸水を入れても再臨界は防止できない。

（注１２）

工事实績 九州電力玄海原子力発電所 3 号機・4 号機（大林組）

<http://www.obayashi.co.jp/chronicle/works/07900.html>

（一部転載）海面下 21m まで掘削するため海水の浸透を防止する遮水グラウト工法を採用した。

※グラウト：空洞、空隙、隙間などを埋めるために注入する流動性の液体のこと（上記サイトの解説）

（注１３）

（前記）資料 1 0 8 「添 3.1.2.11-5 (PDF ファイルの 138 頁)」<https://www.nsr.go.jp/data/000176076.pdf>

（一部転載）海水にはほう素濃度換算で 200ppm 程度の中性子吸収効果が見込まれる。

（注１４）

前記した「玄海原子力発電所 3 号炉及び 4 号炉 重大事故等対策の有効性評価に係る補足説明資料」の「添 3.5.3-8 (130 頁)」に以下の図（写真）がある。同じく「添 3.5.3-33 (155 頁)」の説明によると、キ

資料（4）

キャビティ室天井奥の空間から（原子炉下部の貫通部より）出ているケーブルは「炉内核計装コンポジット」、ケーブル周囲の構造物は「コンポジットサポート」、キャビティ床から原子炉まで高さ 5m とある。

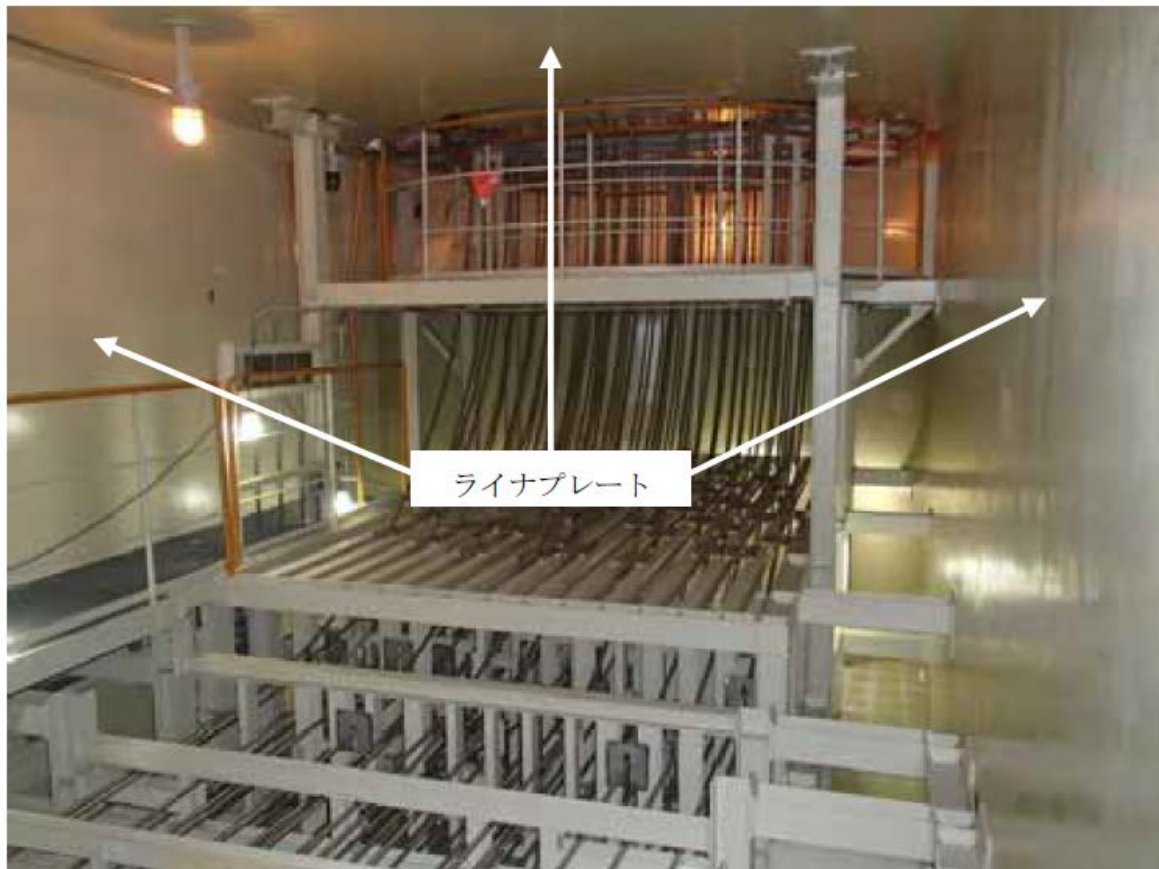


図 2.1.9 原子炉下部キャビティ室内面の状況

福島原発のロボットによる内部調査で原子炉底から溶け落ちた核燃料などが、原子炉下側にある構造物を部分的に溶かしていたり、それらの上に堆積していたりする映像が公表された。玄海原発の場合も原子炉下側に多様な構造物が存在するため、溶け落ちた核燃料などは多様な分布になるのではないかと？

(注15)

変則的臨界、すなわち最小臨界量になるのは球状とは限らないこと、中性子の無限増倍率がたとえ 1.000 以下であっても、反射体の配置により実効増倍率は 1.000 を超え、核分裂連鎖反応の臨界超過になる可能性は 1970 年代から原子力関係者の一部には知られていた[1,2,3]。

[1] E.D. Clayton, Anomalous-of-Nuclear-Criticality-Rev.5(1979)

http://www.scintillators.ru/booc/criticality/technical/12808/ref_010.pdf

[2] E.D. Clayton, Anomalous-of-Nuclear-Criticality-Rev.6(2010)

http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-19176.pdf

(166P より一部転載) Contrary to the usual expectation, the sphere may not be the configuration of least mass after all; the reflected cube may be somewhat less under certain circumstances.

[3] 片倉純一「臨界安全と変則的臨界」炉物理の研究 No.36(1987)10

http://rpg.jaea.go.jp/else/rpd/annual_report/UptoNo53/No36.pdf