

## 「県民の意見」に対するサイクル機構の見解

### 7. 蒸気発生器の安全性

平成14年 2月13日

核燃料サイクル開発機構

7章 蒸気発生器の安全性

いただいた意見：

蒸気発生器ではナトリウムと水が接近しており、この部分での安全確保はどうなっているのか。万一ナトリウムが漏れて水と反応した時、どのような事態になるのか。そういった事故を未然に防ぐ方法についてどのような研究・改良がされているのか。

「もんじゅ」の蒸気発生器細管損傷事故は軽水炉以上に避けがたく、事故を収束させる対策についてそのまま信用して受け取れない。

<p>論点</p>	<p>&lt; 1 &gt; 蒸気発生器のナトリウムと水が接近している部分での安全確保</p>
<p>「もんじゅ」での対応</p>	<p>1 蒸気発生器は以下のように設計・製作・運転することによって健全性、安全性を確保している。</p> <p>(1) 健全性の確保</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 蒸気発生器を含む2次系の機器・配管類は、温度、圧力等、使用される条件を考慮して設計、製作している。また、伝熱管破損時の圧力上昇に対しても、破損しないように設計、製作している。</li> <li>2) 腐食や高い温度に耐えるよう、使用環境に適した材料(蒸発器：クロムモリブデン鋼、過熱器：ステンレス鋼)を使用している。</li> <li>3) 伝熱管は振動しないように支持し、振動による損傷を防止している。</li> <li>4) 製作時には、国の検査を受け、異常のないことを確認している。</li> <li>5) 運転時には、ナトリウム側の純度管理、水・蒸気側の水質管理を十分に行い、伝熱管の腐食を抑える。</li> <li>6) 定期的に伝熱管の検査を行い、大きな破損に至るような不具合が伝熱管に生じていないことを確認する。</li> </ol> <p>(2) 万一、伝熱管が破損した場合の安全確保(資料 2-2 図1-1、図2-3)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 伝熱管が破損した場合、伝熱管内の水・蒸気が伝熱管の外に漏えい(水漏えい)しナトリウムと水が反応して2次系の水素濃度や圧力が上昇する。              2次系：2次ナトリウム及び2次カバーガス              2次カバーガス：2次ナトリウムを覆うアルゴンガス</li> <li>2) これらの現象を水素計やカバーガス圧力計などの検出器により検出し、原子炉を停止する。</li> <li>3) 水・蒸気を素早く放出し、ナトリウムと水の反応を停止させる。</li> <li>4) 原子炉が停止した後の原子炉の崩壊熱は、健全ループ(事故が発生していないループ)で除去する。</li> </ol>

論点	<p>&lt; 2 &gt; 万一ナトリウムが漏れて水と反応した時、どのような事態になるのか。そういった事故を未然に防ぐ方法についてどのような研究・改良がされているのか。</p>
「もんじゅ」での対応	<p>1 ナトリウムと水が反応した時の事象</p> <p>(1) ナトリウム・水反応</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) ナトリウムと水が反応すると、水素、水酸化ナトリウム等の反応生成物が発生する。</li> <li>2) 反応熱が発生する。</li> </ol> <p>(2) プラントへの影響</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 発生する水素により、2次系の水素濃度が上昇する。</li> <li>2) 発生する水素により、2次系の圧力も上昇する。</li> </ol> <p>(3) ジェット流による隣接伝熱管の破損</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) ナトリウムと水が反応して生じる反応生成物は、高温で浸食性のジェット流となる。</li> <li>2) 小漏えい 発生するジェット流は細い。 隣接する伝熱管に当たると、当たった部分が損耗して伝熱管の破損を招く可能性がある。(ウエステージ型破損)</li> <li>3) 中漏えい 発生するジェット流は広がり、隣接する伝熱管を取り囲む。 ジェット流にさらされた伝熱管は熱せられ、強度が低下する。水漏えい検出ができず、ナトリウム・水反応を長く継続させた場合は、内圧で破損する可能性がある。(高温ラプチャ型破損)</li> <li>4) 大漏えい 隣接する伝熱管の破損は発生しないことが、実験で確認されている。</li> </ol> <p>資料 2-2 図3-1に蒸気発生器伝熱管破損時の水漏えい率と主要な現象を示す。</p> <p>(4) 「もんじゅ」の設備対応</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 伝熱管破損の影響が原子炉に及ぼさないように、1次主冷却系と水・蒸気系の間に2次主冷却系を設けている。</li> <li>2) ナトリウムと水の反応により、2次系の水素濃度や圧力が上昇することから、これらを検出器により直ちに検知して原子炉を停止する。 検出器：水素計、カバーガス圧力計、圧力開放板開放検出器</li> <li>3) 原子炉停止に続き、直ちに蒸気発生器から水・蒸気を急速に抜き取り(約100秒)、ナトリウムと水の反応を終息させる。</li> <li>4) 原子炉が停止した後の原子炉の崩壊熱は、健全ループの空気冷却器で除去する。 資料 2-2 図2-3に蒸気発生器伝熱管破損時の対応の流れを示す。</li> </ol>

論 点	< 2 > 万一ナトリウムが漏れて水と反応した時、どのような事態になるのか。そういった事故を未然に防ぐ方法についてどのような研究・改良がされているのか。
「 も ん じ ゆ 」 で の 対 応	<p>2 サイクル機構の大洗工学センターでの研究開発</p> <p>(1) 昭和46年より種々の実験を実施 目的： ・伝熱管で水漏えいが発生した時の現象の把握 ・伝熱管で水漏えいが発生した時適切な対応がとれることの確認 得られた知見： ・高温ラプチャ型破損は、「もんじゅ」の運転条件では発生しない。 ・伝熱管破損は初期の1本の完全破断を含め、伝熱管4本の完全破断相当の水漏えいを想定すれば、十分に厳しい評価ができる。</p> <p>(2) 「もんじゅ」の約1/2スケールモデル(出力比約1/5)の蒸気発生器を設計・製作し、実際に約35000時間(ナトリウム側)の運転試験を実施。制御性、運転性等について実証。試験で得られた知見はスケールアップを考慮しつつ、もんじゅの蒸気発生器の設計に反映された。</p>

論 点	< 3 > 「もんじゅ」の蒸気発生器細管損傷事故は軽水炉以上に避けがたいか。
「 も ん じ ゆ 」 で の 対 応	<p>1 「もんじゅ」の蒸気発生器は、伝熱管破損事故が発生しないように以下のような対策が取られており、軽水炉と同様、細心の注意を払いつつ設計、製作および運転管理を行っている。</p> <p>(1) 蒸気発生器は高い品質で設計・製作している。 ・使用温度、使用圧力等、使用条件を考慮し、破損しないように設計している。 ・国の規格、基準に従い設計されており、かつ国の認可を受けている。 ・国の検査を受けながら製作している。 ・応力腐食割れが想定される蒸気発生器では、伝熱管には応力腐食割れの起こりにくいクロムモリブデン鋼を採用している。 (応力腐食割れの心配がなく、高温強度が要求される過熱器はステンレス鋼を用いている。)</p> <p>(2) 伝熱管破損が発生しないように以下のような運転管理を行う。 ・伝熱管の外側(ナトリウム側)については、ナトリウムの純度管理を行い、腐食を抑制している。 ・伝熱管の内側(水蒸気側)については水質管理を行い、腐食を抑制している。 ・蒸気発生器に高い熱応力が発生しないようにプラントの起動及び停止手順を定めている。 ・伝熱管は定期的に検査を行うとともに、プラント運転中は検出感度の高い検出器を用いて絶えず伝熱管からの水漏えいの有無を監視している。</p> <p>2 従って、「もんじゅ」の蒸気発生器が軽水炉以上に伝熱管事故が避けがたいということはない。</p> <p>尚、万一蒸気発生器伝熱管破損事故が発生した場合にも、原子炉に影響が及ばないように、1次主冷却系と水・蒸気系との間に2次主冷却系を設けている。</p>

いただいた意見：

蒸気発生器細管破断時、急激な器内の圧力上昇に対し、「圧力開放板」が設計通りに機能して一次系配管への圧力伝達を避けられるのか。

「圧力解放板」の動作試験を実機規模の実証試験として行っているのか。コンピュータ解析試験で済ませてはいないか。システムを構成する重要機器については、実機規模での実証試験を義務づけることが必要ではないか。

蒸気発生器が破壊されれば影響が中間熱交換器におよび、原子炉の冷却がうまくいけなくなり、原子炉の暴走という事故につながる可能性がある。

論点	< 4 > 蒸気発生器細管破断時、急激な器内の圧力上昇に対し、「圧力開放板」が設計通りに機能して一次系配管への圧力伝達を避けられるのか。「圧力解放板」の動作試験を実機規模の実証試験として行っているのか。コンピュータ解析試験で済ませてはいないか。
「もんじゅ」での対応	1 圧力開放板 圧力開放板は信頼性が高く、実証試験も実施しているので、設計通り確実に開放する。 (1) 機能 1) 圧力開放板は、過熱器、蒸発器にそれぞれ設置されている。資料 2-2 図1-1 2) 過熱器または蒸発器で伝熱管破損が起きると、ナトリウム・水反応で発生する水素ガスにより圧力が上昇する。圧力が圧力開放板の開放圧力を超えると、圧力開放板が破裂し、内部の水素ガス等を燃焼処理した後、放出する。 (2) 構造 1) 圧力開放板は、バキュームサポート、ディスク、スリットディスクで構成され、中間のディスクが気密性を保持する。資料 2-2 図2-2 2) ディスクはインコネル600で非常に薄い。 (過熱器：0.05mm・蒸発器：0.063mm) 3) 圧力開放板は構造が単純で信頼性が高い。 (3) 作動試験 圧力開放板が設計どおりの圧力で破裂することは、同一条件で製作した実物を使い、実際に圧力をかける試験を行い確認している。 資料 2-2 図2-2に作動試験前後の圧力開放板の状況写真を示す。

論 点	< 5 > システムを構成する重要機器については、実機規模での実証試験を義務づけることが必要ではないか。
「 もんじゅ 」 で の 対 応	<p>( 1 ) システムを構成する重要機器の実証試験は法的に義務付けられていないが、蒸気発生器、ナトリウムポンプ、制御棒駆動機構等、軽水炉で経験のない機器については次のような試験を行い、結果を「もんじゅ」機器の設計、製作に反映している。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 各種基礎試験（材料試験、構造試験、ナトリウム中試験）</li> <li>・ 安全性試験（ナトリウム漏えい試験）</li> <li>・ 縮小部分モデル及び実機規模での実証試験</li> <li>・ 解析コードによる予測、評価</li> </ul> <p>( 2 ) 大洗工学センターで行ってきた「もんじゅ」のための主な試験を下記に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原子炉容器 部分モデル試験</li> <li>・ 炉内構造物 1 / 2 モデル試験</li> <li>・ 炉心上部機構 1 / 6 ・ 1 / 1 0 モデル試験</li> <li>・ 熱輸送系機器・配管 <ul style="list-style-type: none"> <li>1 MW蒸気発生器試験</li> <li>5 0 MW蒸気発生器試験</li> <li>1 次主冷却系循環ポンプ運転試験</li> <li>電磁ポンプ運転試験</li> <li>中間熱交換器運転試験（5 0 MW蒸気発生器試験施設）</li> <li>空気冷却器運転試験（5 0 MW蒸気発生器試験施設）</li> </ul> </li> <li>・ 燃料取扱系機器</li> </ul>

論 点	< 6 > 蒸気発生器が破壊されれば影響が中間熱交換器におよび、原子炉の冷却がうまくい かなくなり、原子炉の暴走という事故につながる可能性があるのか。
「 もんじゅ 」 で の 対 応	<p>1 「もんじゅ」は以下のように原子炉の暴走という事故につながる可能性はない。</p> <p>(1) 事故評価</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 蒸気発生器の伝熱管破損時には高圧の水・蒸気が2次系側(蒸気発生器のナトリウム側)へ漏えいし、2次系の圧力が上昇する。</li> <li>2) この圧力上昇に対して、大洗工学センターでの研究開発成果を踏まえ、最も厳しくなる事故条件を仮定して、解析評価を行っている。</li> </ol> <p>(2) 事故推移</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 伝熱管破断直後は、高圧の水・蒸気が2次系側(蒸気発生器のナトリウム側)に噴出することにより2次主冷却系に急峻な圧力上昇が発生する。これを初期スパイク圧という。</li> <li>2) 初期スパイク圧は、ごく短時間で減衰する。</li> <li>3) その後、蒸気発生器内でのナトリウムと水の化学反応によって発生する水素ガスの蓄積により、圧力上昇が発生する。これを準定常圧という。</li> <li>4) 準定常圧によりカバーガス部分に設置している圧力開放板が破裂し、2次系の過度な圧力上昇を防止する。</li> <li>5) 圧力開放板が破裂すると、当該蒸気発生器を隔離するとともに、原子炉は自動停止し、蒸気発生器伝熱管内の水・蒸気は放出ラインから急速に排出されて水漏えいは停止し、事故は終息する。</li> <li>6) 発生した水素ガスは反応生成物収納容器を経て大気へ導かれ、大気へ放出される段階で点火され、大気放出部で燃焼する。</li> <li>7) 従って、ナトリウムと水との反応で発生した水素ガスが爆発することはない。</li> </ol> <p>(3) 評価結果</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 上記の蒸気発生器の伝熱管破断事故について、2次系内の圧力上昇を解析により評価した。圧力変化を資料 2-2 図4-1に示す。</li> <li>2) 本解析評価の結果、初期スパイク圧及び準定常圧いずれに対しても、蒸気発生器、2次系の機器・配管、中間熱交換器の健全性が損なわれないことを確認した。</li> <li>3) このことから、蒸気発生器の伝熱管破断事故は、1次主冷却系や炉心の健全性に影響を及ぼすことなく安全に終息することを確認した。</li> </ol> <p>(4) 「もんじゅ」は3ループで構成されており、万が一蒸気発生器の事故で1ループの運転が不能となっても残りの2ループで炉心の崩壊熱は除去される。</p>

いただいた意見：

英国高速増殖炉PFRの蒸気発生器細管破断事故は、「もんじゅ」の事故想定を遙かに超えている。この事故の経験が「もんじゅ」の安全審査にどう活かされているのか

論 点	< 7 > 英国高速増殖炉PFRの蒸気発生器細管破断事故は、「もんじゅ」の事故想定を遙かに超えているか。
「 もん じゅ 」 で の 対 応	<p>(1) 「もんじゅ」の安全審査では伝熱管4本の完全破断に相当する水漏えいを想定しており、PFRでは伝熱管が多数(40本)破損する事故が発生したが、事故時のPFRと「もんじゅ」では、設備設計等、状況が異なり、「もんじゅ」の安全審査の事故想定が不適切であることはない。</p> <p>(2) PFR事故</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1) ナトリウム流路の内筒を構成する板の重ね合わせ部隙間が大きくなり、バイパス流が発生した。 そのバイパス流が、最内層伝熱管に衝突し、伝熱管が振動を引き起こした。 その振動により伝熱管と内筒が接触して減肉を起こし、内1本が破損した。</li><li>2) 伝熱管の破損を検知するための検出器(ナトリウム中水素検出計)が故障した状態で運転していた。</li><li>3) 急速に水・蒸気を放出する設備が設置されていなかった。</li><li>4) 上記2)、3)の理由により、早期にナトリウム・水反応を終息させることができなかつたため、高温ラブチャ型破損が生じ、多数の伝熱管が損傷した。</li></ol> <p>(3) 「もんじゅ」</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1) 蒸気発生器の内筒は溶接構造であり、バイパス流は発生せず、伝熱管が振動することはない。</li><li>2) 水素計、カバーガス圧力計及び圧力開放板開放検出器という3種類の検出器を設置しており、また、検出器が故障した状態で運転することはない。</li><li>3) 伝熱管内部の水・蒸気を急速に放出するための放出弁を設置している。</li></ol> <p>(4) これらの設備対応により、もんじゅでは万一伝熱管の破損が発生した場合でも、もんじゅでは多数の伝熱管が損傷するような事態にならない。</p> <p>資料 2-2 図5-3にPFRの事故の原因と「もんじゅ」の設備を比較して示す。</p> <p>なお、PFRの事故の水・蒸気の漏えい率(単位時間あたりの水漏えい量)は「もんじゅ」の事故で想定している値より小さい。</p>

<p>論 点</p>	<p>&lt; 8 &gt; 英国高速増殖炉PFRの蒸気発生器細管破断事故の経験が「もんじゅ」の安全審査にどう活かされているのか</p>
<p>「 もん じゅ 」 で の 対 応</p>	<p>( 1 ) 英国 P F R の蒸気発生器伝熱管破損事故は、「もんじゅ」の原子炉設置が許可された ( 1 9 8 3 年 ( 昭和 5 8 年 ) 5 月 ) 後の、 1 9 8 7 年 ( 昭和 6 2 年 ) 2 月に発生している。</p> <p>( 2 ) P F R 事故は「もんじゅ」の安全審査以降に起こったものであり、直接、安全審査に反映されてはいない。</p> <p>( 3 ) 「もんじゅ」の安全審査においては、実規模の試験結果を踏まえ、更に余裕を持たせて伝熱管からの最大漏えい率を想定し、蒸気発生器伝熱管破損事故の評価を行い、そのような事故を想定しても安全性に影響を及ぼさないことを確認している。</p> <p>( 4 ) 「もんじゅ」は当初の設計から、水・蒸気を急速に放出できる設備としており、また伝熱管破損による水漏えいを検出する検出器が故障した状態で運転することはないことから、P F R で起こったような破損事故は起こらない。</p>

論点	< 9 > 軽水炉で蒸気発生器に係る事故が多発している。
「もんじゅ」での対応	<p>1 軽水炉における蒸気発生器に係るトラブル</p> <p>(1) PWR(加圧水型軽水炉)の蒸気発生器トラブルは平成12年度までに、約120件が法律に基づき国に報告されている。</p> <p>(2) 内訳は蒸気発生器伝熱管損傷の調査・補修のために原子炉を手動停止したもの、定期検査中の検査で伝熱管に損傷が発見されたものである。</p> <p>(3) 蒸気発生器の取り替え、水質管理の徹底等により、トラブルの発生件数は近年減少している。</p> <p>2 軽水炉との違い</p> <p>(1) PWRの蒸気発生器は、原子炉に直接つながっている1次系とタービンに接続している2次系の間に位置する。</p> <p>(2) PWRの蒸気発生器で伝熱管損傷が生じると、1次冷却材である水が2次冷却材中に流出する。</p> <p>(3) PWRの場合、2次冷却材も水であるため蒸気発生器伝熱管損傷が発生しても、蒸気発生器内で冷却材が反応することはないが、漏れいする1次冷却材の量が多いと原子炉の冷却能力を確保する必要がある。</p> <p>(4) 「もんじゅ」は、PWRの1次系と2次系の間に、更に1系統付加した系統構成を有しており、「もんじゅ」の蒸気発生器は原子炉と直接つながっていない。「もんじゅ」の蒸気発生器は、ナトリウムと水が伝熱管で隣り合うので、伝熱管損傷が発生するとナトリウム-水反応が発生するが、原子炉の冷却に影響が及ぶことはない。</p> <p>3 PWR蒸気発生器伝熱管損傷の主な原因、防止策、対策</p> <p>(1) 原因と防止策</p> <p>1) 腐食によるもの ==&gt; 伝熱管材料の改良と水質管理方法の向上</p> <p>2) 応力腐食割れによるもの ==&gt; 伝熱管材料の改良と熱処理の実施</p> <p>3) 美浜2号の蒸気発生器伝熱管損傷は、伝熱管を支える振れ止め金具が設計通り取り付けられていなかったため、伝熱管支持部で伝熱管に繰り返し力が加わり、疲労により亀裂が発生したものである。</p> <p>(2) 対策</p> <p>1) PWRで伝熱管損傷が発見された場合は、当該伝熱管に施栓するか、施栓が多くなった場合は、蒸気発生器ごと交換する対策がとられている。</p> <p>(3) 「もんじゅ」の対応</p> <p>1) &lt; 1 &gt; 1(1)に示したように「もんじゅ」でも伝熱管損傷の防止策がとられている。</p>