

2. 原子炉格納容器内窒素封入設備

2.1. 概要

2.1.1 現状及び中期的見通し

福島第一原子力発電所1～3号機の原子炉格納容器については、設備本来の気密性が損なわれているため*、同時に格納容器内雰囲気を不活性に維持することについても困難な状況であった。

そのなかで接近が可能であった格納容器内につながる既設配管（1号機：不活性ガス系配管、2号機：可燃性ガス濃度制御系配管、3号機：原子炉格納容器漏えい率検査用配管）の健全性を目視にて確認し、これらの配管と仮設設備とを組み合わせ、原子炉格納容器内雰囲気を不活性とする原子炉格納容器内窒素封入設備を構成した。

原子炉格納容器内窒素封入設備の構成は、図2-2に示すように、窒素ガス分離装置と窒素封入ライン（ヘッダー、弁、圧力計、流量計等）からなる。原子炉格納容器内は冷却水の放射線分解によって継続的に水素及び酸素が発生しており、原子炉へ継続的に注水することによって、原子炉圧力容器及び原子炉格納容器内の温度が十分に低下した状態においては蒸気の発生が収まるため、原子炉格納容器内の水素・酸素濃度が高まり、可燃限界に達する懸念がある。このため、水素爆発を防止することを目的に原子炉格納容器内につながる既設配管へ仮設の窒素封入ラインを接続し、窒素ガス分離装置より窒素を封入することで原子炉格納容器内の水素濃度を可燃限界以下に保つものとしている。

平成23年10月17日時点での原子炉格納容器への窒素封入量は、1号機は28m³/h、2号機は13m³/h、3号機は14m³/hであり、これにより原子炉格納容器内雰囲気は水素濃度が低い不活性な雰囲気に保たれていると評価していたが、平成23年10月28日に2号機に設置した原子炉格納容器ガス管理設備にて確認された水素濃度が当初の想定より高いことが確認された。

このことから、今回2号機で確認された事象の評価を行った結果、原子炉圧力容器内に比較的高い濃度の水素が存在し、これが原子炉格納容器へ押し出されたこと等により水素濃度が上昇したと推定した。

そのため、原子炉圧力容器内にも同様に窒素を封入することとし、1号機及び3号機は11月30日、2号機は12月1日より開始し、1/2号機は12月3日、3号機は12月4日に原子炉圧力容器全量が置換される量の窒素を封入した。

今後は時間の経過に伴って、燃料の崩壊熱の減衰とともに放射線の総エネルギーも減少するため、原子炉格納容器内窒素封入設備に必要とされる封入量は減少していく方向である。このため、今後3年間にわたり原子炉格納容器内窒素封入設備にて原子炉圧力容器内雰囲気及び原子炉格納容器内雰囲気を不活性に維持することが可能である。

※：格納容器トップヘッドフランジ部および原子炉格納容器の比較的低い位置等から漏えいしており、1号機、2号機、3号機の順に原子炉格納容器の気密性が悪いものと想定している。

2.1.2 基本的対応方針及び中期的計画

当初、原子炉格納容器内へ窒素を封入することで原子炉压力容器内にも窒素が流入するものと想定をしていたが、2号機原子炉格納容器ガス管理設備において、当初の想定よりも高い水素濃度が確認されたことから、原子炉压力容器内にも比較的高い濃度の水素が滞留していたものとする。したがって、原子炉格納容器に加えて原子炉压力容器内にも窒素を封入することとし、以下を基本的対応方針とする。

- a. 原子炉压力容器及び原子炉格納容器内の雰囲気の水素の可燃限界以下に維持できる機能を有すること。
- b. 原子炉压力容器及び原子炉格納容器への窒素の封入状況を適切に監視できる機能を有すること。
- c. 動的機器は多重性または多様性及び独立性を備えること。
- d. 異常時にも適切に対応できる機能を有すること。

原子炉格納容器内窒素封入設備は、保守管理を適切に行うことで継続的な運用が可能であると考えられることから、中期的方針としては保守管理を基本とし、今後、必要に応じて改善を行っていくこととする。

2.1.3 異常時の評価

現在、原子炉压力容器及び原子炉格納容器への窒素封入は継続的に行われており、窒素の供給が停止してから压力容器内雰囲気及び格納容器内雰囲気が水素の可燃限界に至るまでは最短でも約30時間程度と評価している。そのため、機器の単一故障や複数の設備が同時に機能喪失した場合においても、水素の可燃限界に至る前に対策を取れることを確認した。

2.2 設計方針

原子炉格納容器内窒素封入設備は、原子炉压力容器内及び原子炉格納容器内における水の放射線分解による水素と酸素の発生量に対して、水素可燃限界に至らないよう（水素濃度：4%以下）継続的に窒素を封入できる設計とする。

そのため、次の設計方針に基づいて設計する。

2.2.1. 窒素ガス供給機能

原子炉格納容器内窒素封入設備は、原子炉圧力容器内雰囲気及び原子炉格納容器内雰囲気を可燃限界以下にするために必要な窒素濃度、窒素封入流量、窒素封入圧力を確保する設計とする。

2.2.2. 逆流防止機能

原子炉格納容器内窒素封入設備は、窒素封入ラインから原子炉圧力容器内ガスや原子炉格納容器内ガスが逆流し、屋外に放出されない設計とする。

2.2.3. 構造強度

原子炉格納容器内窒素封入設備は、材料の選定、製作及び検査について、適切と認められる規格及び基準によるものとする。

2.2.4. 監視機能

原子炉格納容器内窒素封入設備は窒素封入流量、窒素封入圧力などの主要なパラメータが監視できる設計とする。

2.2.5. 多重性・多様性

原子炉格納容器内窒素封入設備のうち動的機器は多重性を備えた設計とし、定期的に機能確認が行える設計とする。また、原子炉格納容器内への窒素封入ラインは多様性を備えた設計とする。

2.2.6. 異常時への対応機能

外部電源喪失の場合でも、所内の独立した電源設備から受電できる設計とする。

さらに、津波等により設備に破壊や損傷が生じた場合であっても、窒素供給が速やかに再開できる設計とする。

2.2.7. 不活性雰囲気の監視機能

原子炉格納容器内の雰囲気が不活性に維持されていることを確認できるよう適切な監視装置を設置する。ただし、直接監視ができない場合は、把握できるパラメータによって評価を行う。

2.2.8. 火災防護

火災の早期検知に努めるとともに、消火設備を設けることで初期消火を行い、火災により安全性を損なうことのないようにする。

2.3. 主要設備

2.3.1. 系統構成

原子炉格納容器内窒素封入設備の系統概略図を図 2-2 に示す。情報棟前 (OP.10,000) に窒素ガス分離装置を 2 台設置 (1 台常用、1 台予備) し、ヘッダーを介して 1～3 号機へ窒素を供給しており、窒素ガス分離装置の単一故障によって窒素封入が長期間停止することを防止する。また窒素ガス分離装置の定期的な機能確認を単独で行えるようにするとともに、系統を隔離しての補修作業が可能となるようにする。更に、津波等による損傷対策として新事務本館東側駐車場 (OP.35,000) にディーゼル発電機駆動 (以下、D/G という。) の高台窒素ガス分離装置を設置する。主要設備構成を以下に記載する。

(1) 窒素ガス分離装置

原子炉格納容器内窒素封入設備は、旧事務本館情報棟前 (OP.10,000) に設置した 2 台 (1 台常用、1 台待機) の窒素ガス分離装置をヘッダーを介して連結し、1～3 号機の原子炉圧力容器及び原子炉格納容器へ窒素を供給できるように構成される。

また予備としては所内電源系統から独立した専用の D/G から受電する高台窒素ガス分離装置を新事務本館東側駐車場 (OP.35,000) に配置する。

更に、新事務本館東側駐車場 (OP.35,000) に設置される処理水バッファタンクバブリング用窒素発生装置とも共用化を図り、不測の事態が生じた場合、交互に窒素を供給できるようタイラインを設置する。

以上の窒素ガス分離装置の他に、窒素供給を補完する設備として、低流量の D/G 駆動膜式窒素分離装置を 3 台配置する。

◎窒素発生能力

常用設備 (140 m³/h : 1 台 120 m³/h : 1 台 切り替えによる交互運転)

高台配置設備 (500 m³/h : 1 台)

処理水バッファタンクバブリング用設備 (60 m³/h : 1 台)

低流量設備 (約 8 m³/h : 3 台)

◎窒素濃度 99%以上

(封入設備は酸素濃度が設定値 (1%) より高くなった場合、自動で窒素の供給を停止し、その後酸素濃度が設定値 (1%) 以下となった段階で供給を再開する設計とする。)

◎窒素封入圧力 0.5MPa [gage]

(2) 窒素封入ライン

原子炉格納容器内窒素封入設備は図 2-1 に示す通り、原子炉圧力容器及び原子炉格納容器の両方へ窒素を供給できるラインを設置する。

(a) 1号機

原子炉压力容器窒素封入ライン：

既設の原子炉压力容器ヘッドスプレイラインのテストラインに接続しており、原子炉压力容器の OP.34,000 の位置より窒素を封入している。

原子炉格納容器窒素封入ライン：

既設の不活性ガス系配管の安全弁のフランジ部に接続しており、原子炉格納容器の OP.7,290 の位置より窒素を封入している。不活性ガス系配管には空気作動弁が使用されており、これに付随する電磁弁について、設置場所（トールス室）における蒸気の影響により故障する可能性が否定できない。そのため、窒素供給の信頼性を向上させる事を目的に、ドライウェル酸素濃度計装ラックへの予備配管を設置している。

(b) 2号機

原子炉压力容器窒素封入ライン：

既設の原子炉压力容器水位計の計装ラインに接続しており、原子炉压力容器の OP.36,000 の位置より窒素を封入している。

原子炉格納容器窒素封入ライン：

既設の可燃性ガス濃度制御系 A 系の配管テストタップに接続しており、原子炉格納容器の OP.15,380 の位置より窒素を封入している。

(c) 3号機

原子炉压力容器窒素封入ライン：

既設の原子炉压力容器水位計の計装ラインに接続しており、原子炉压力容器の OP.36,000 の位置より窒素を封入している。

原子炉格納容器窒素封入ライン：

既設の格納容器漏えい率検査用予備ラインに接続しており、原子炉格納容器の OP.15,080 の位置より窒素を封入している。

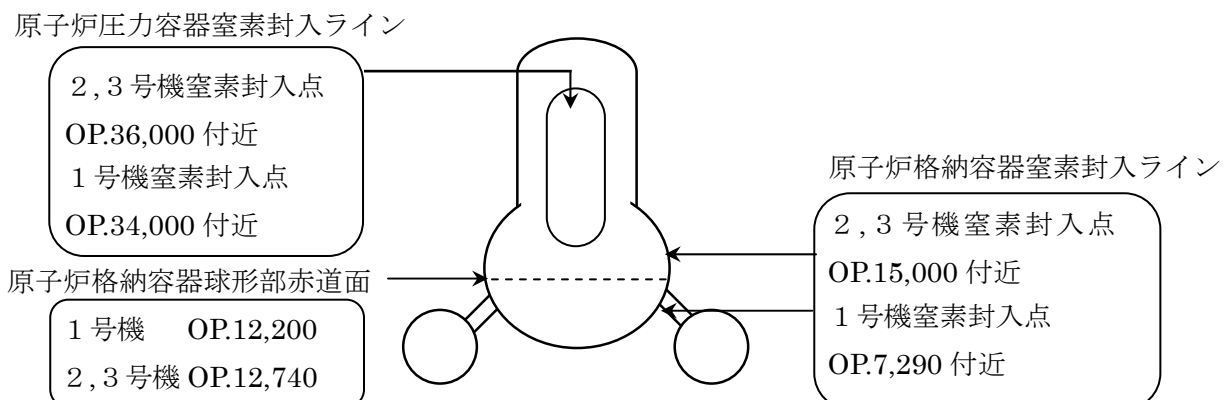


図 2-1 窒素封入ライン概略図

窒素封入ラインは、ガスが逆流するのを防止するため、既設配管との取り合い部に近い位置に逆止弁を設置するとともに、ラインからの漏えいにより全体の圧力が低下し窒素の供給に支障が出ないように、適宜コック弁を設け、漏えい部を適宜隔離できるようにしている。また、原子炉格納容器への窒素の封入は、原子炉圧力容器へ封入した窒素が原子炉格納容器に流入することによっても封入されることから、多様性が確保される設計となっている。

(3) 監視装置

原子炉格納容器内窒素封入設備は、窒素ガス濃度、窒素ガス封入流量、窒素ガス封入圧力等のパラメータを監視し、設計したとおり原子炉圧力容器内及び原子炉格納容器内へ窒素が適切に封入されていることを確認する。

これらのパラメータのうち、窒素ガス封入流量および窒素ガス封入圧力については重要免震棟よりウェブカメラを用いた遠隔監視が可能な設備としている。

(4) 電源

原子炉格納容器内窒素封入設備の現状の電源構成図を図 2-3 に示す。当該設備の電源は、仮設 1 / 2 号 M / C (B) より受電しており、当該 M / C は複数の外部電源から手動による受電切替が可能な設計となっている。

また、高台 (OP.35,000) に配置した窒素発生装置には単独の D / G を有しており、外部電源喪失時にも窒素の供給が可能となっている。

平成 24 年 3 月時点での所内電源の増強目標構成図を図 2-4 図に示す。現状、常用の窒素ガス発生装置 2 台は仮設 1 / 2 号 M / C (B) より受電しているが、増強後は所内共通 M / C 1 (A) 及び同 1 (B) からそれぞれ独立して受電される予定である。

監視装置電源については、1 ~ 3 号機 流量計監視カメラ、1、2 号機 圧力計監視カメラは仮設 1 / 2 号 M / C (B) より受電している。3 号機 圧力計監視カメラは仮設 3 / 4 号 M / C (A) より受電している。

(5) 津波対策他

津波等により、原子炉格納容器内窒素封入設備に破壊や損傷が生じることを想定し、高台 (OP.35,000) に高台窒素ガス分離装置を設置し、ホースや取り付け治具についても予備品を準備し、速やかに窒素の供給が再開できるようにしている。

(6) 不活性雰囲気監視

原子炉格納容器内が不活性雰囲気維持されていることを監視するため、原子炉格納容器ガス管理設備の水素濃度及び酸素濃度の確認を行う。(添付資料-3)

なお、原子炉格納容器ガス管理設備を設置するまでの間については、原子炉格納容器内窒素封入設備にて確認できるパラメータ（封入窒素ガス濃度、原子炉格納容器窒素封入流量、原子炉格納容器窒素封入圧力、原子炉圧力容器窒素封入流量等）により、不活性雰囲気の評価を行う。

(7) 火災防護

原子炉格納容器内窒素封入設備には潤滑油やD/G用燃料等の危険物が存在するため、初期消火の対応ができるよう、近傍に消火器を設置している。また、補給用潤滑油については適切な場所にて保管を行う。

2.4. 設備の構造強度

窒素封入設備は、重要度分類指針上の不活性ガス系設備に相当するクラス3機器と位置付けられる。この適用規格は、「JSME S NC-1 発電用原子力設備規格 設計・建設規格（以下、設計・建設規格という）」で規定されるものであるが、設計・建設規格は、鋼材を基本とした要求事項を設定したものであり、耐圧ホース等の非金属材料についての基準がない。従って、鋼材を使用している主要設備については、設計・建設規格のクラス3機器相当での評価を行い、非金属材料については、当該設備に加わる機械的荷重により損傷に至らないことをもって評価をおこなう。この際、当該の設備がJISや独自の製品規格等を有している場合や、試験等を実施した場合はその結果などを活用し、評価を行う。（添付資料－4、5）

2.5. 耐震性

原子炉格納容器内窒素封入設備は耐震設計審査指針上の耐震Cクラス相当の設備と位置づけられることから、原則として一般構造物と同等の耐震性を有する設計とする。

具体的には、「建築設備耐震設計・施工指針（2005年版）」を参考とし、静的震度（1.2Ci）に基づく主要機器の転倒評価を行った。この結果、窒素ガス分離装置について静的震度（1.2Ci）に対する評価で問題ないことを確認した。

その他にも主要な設備への固縛の実施や、フレキシビリティを有する材料を使用するなどし、耐震性を確保する。また、フレキシビリティのない設備の取り合い部等については、地震後の設備点検にて異常のないことの確認を行う。（添付資料－4、5参照）

2.6. 主要仕様

原子炉格納容器内窒素封入設備の主要仕様を表2-2に、配管仕様を表2-3に示す。

2.7. 運用

2.7.1 運転管理

(1) 窒素封入量について

平成 23 年 12 月 6 日時点における燃料の崩壊熱を基に水素発生量を求め、原子炉压力容器内及び原子炉格納容器内の水素濃度が均一であると仮定した場合に水素濃度を 4 % 以下にするための必要窒素封入量は、1 号機 : $5\text{Nm}^3/\text{h}$ 、2 号機 : $7\text{Nm}^3/\text{h}$ 、3 号機 : $7\text{Nm}^3/\text{h}$ となる。(添付資料-1 参照)

一方、2 号機において、10 月 28 日に原子炉格納容器ガス管理設備の運用を開始したところ、抽気ラインの水素濃度が 0.9% から 2.9% 程度まで上昇した。このため、原子炉格納容器の水素濃度を低減させるため、2 号機原子炉格納容器への窒素封入量を段階的に増加させ 11 月 3 日に $26\text{Nm}^3/\text{h}$ とした。これは、原子炉格納容器ガス管理設備の運用により原子炉格納容器内の水素濃度が直接測定できることによって分かった事象であり、この時点では、水素濃度の上昇は原子炉格納容器上部に存在する比較的高い濃度の水素が原子炉格納容器ガス管理設備によって抽出されたものと推定した。

同様のことが 1 / 3 号機においても考えられることから、原子炉格納容器への窒素封入量が少ない 3 号機については、原子炉格納容器への窒素封入量を $28\text{Nm}^3/\text{h}$ に増加させた。なお、1 号機については 4 月 7 日より $28\text{Nm}^3/\text{h}$ にて原子炉格納容器へ窒素を封入しており、十分な窒素が供給されている。

その後、2 号機原子炉格納容器ガス管理設備の水素濃度の推移を基に水素発生量及び水素発生場所を改めて評価した結果、1 ~ 3 号機とも原子炉压力容器内に比較的高い濃度の水素が存在している可能性が高いと判断した。そこで、これまでの原子炉格納容器への窒素封入に加えて、新たに原子炉压力容器への窒素の封入を 1 / 3 号機は 11 月 30 日、2 号機は 12 月 1 日より開始し、12 月 6 日時点で 1 号機 : $10\text{Nm}^3/\text{h}$ 、2 号機 : $10\text{Nm}^3/\text{h}$ 、3 号機 : $10\text{Nm}^3/\text{h}$ にて窒素を封入している。これらの原子炉压力容器及び原子炉格納容器に封入している窒素の量は上述の必要窒素封入量と比べて十分な量である。(添付資料-8 参照)

原子炉格納容器ガス管理設備が設置されているプラントについては原子炉格納容器の水素濃度を直接確認することが可能であることから、今後は水素濃度に応じて、適宜窒素の封入量及び原子炉格納容器ガス管理設備の抽気量を変更させることとする。

なお、原子炉格納容器内窒素封入設備が停止した場合の時間余裕を確保する観点から、12 月 7 日に、原子炉压力容器への窒素封入量を 1 号機 : $15\text{Nm}^3/\text{h}$ 、2 号機 : $15\text{Nm}^3/\text{h}$ 、3 号機 : $15\text{Nm}^3/\text{h}$ に増加させる一方、原子炉格納容器への窒素封入量は時間余裕を考慮した上で減少させる計画である。(添付資料-2 参照)

(2) 設備の運転状態の監視

原子炉格納容器内窒素封入設備の運転パラメータのうち、窒素ガス封入流量及び窒素ガス封入圧力については重要免震棟内の監視室のモニタで監視を行い、窒素ガス濃度やドレンの排出状況などについては、1日1回の巡視点検で監視を行っている。これらの運転パラメータを監視することにより、設備の運転状態を把握している。なお、原子炉格納容器ガス管理設備設置後は水素濃度の監視を併せて行い、原子炉格納容器内の雰囲気の不活性であることを確認する。

原子炉格納容器内窒素封入設備の監視パラメータは、異常時に重要免震棟への警報は発生しないが、原子炉格納容器内窒素封入設備の機能が停止してから原子炉格納容器内の雰囲気が可燃限界に至るまでの時間余裕が1～3号機とも原子炉压力容器への窒素封入量を $15\text{Nm}^3/\text{h}$ とした以降は30時間程度確保されることから、原子炉压力容器への窒素の封入量を6時間に1回確認するとともに、保安要員による巡視点検を1日に1回行うことで、設備の健全性を担保する。(添付資料-2参照)

また、当該設備には潤滑油やD/G用燃料等の危険物が存在するため、初期消火の対応ができるよう、近傍に消火器を設置することとする。また、巡視等を行うことで火災の早期検知に努める。

(3) 地震後の巡視点検

原子炉格納容器内窒素封入設備は、耐震Cクラスの耐震性を有しており、かつ設計以上の震度に対しては設備の固縛や仮設ホースのフレキシビリティにより、耐震性を確保しているが、震度5弱を超えるような地震が発生した場合は、地震後に設備に対して巡視点検を行い、異常のないことの確認を行う。

2.7.2 異常時の措置

(1) 機器の単一故障

窒素封入設備の主要な機器は多重化を行っており、単一故障については切換することによって対応が可能である。ただし、仮設ホースの一部については予備品との取替にて対策を実施する。

a. 窒素ガス分離装置故障

現在使用している窒素ガス分離装置が故障した場合は、現場にて待機状態となっている窒素ガス分離装置の起動を行い、原子炉格納容器への窒素供給を再開する。

(所要時間(目安): 2時間程度)※

b. 電源喪失

窒素封入設備の電源は仮設1/2号M/C(B)から供給されているが、当該M/C

は複数の外部電源から手動による受電切替が可能であることから、送電系統の機能喪失など電源切替に長時間を要しない場合は、電源の切替操作により原子炉格納容器への窒素封入を再開する。

(所要時間 (目安) : 2 時間程度) ※

変圧器や所内母線の故障など電源切替に長時間を要する場合は、予め待機しているディーゼル発電機を持つ窒素ガス分離装置を起動することで、原子炉格納容器への窒素供給を再開する。

(所要時間 (目安) : 3 時間程度) ※

c. 窒素供給ラインの損傷

窒素供給ホースが破損した場合は、予備品の仮設ホースと交換する。

(所要時間 (目安) : 8 時間程度) ※

※ : 所要時間 (目安) とは復旧作業の着手から完了までの時間 (目安) である。

平成 23 年 12 月 7 日時点において、原子炉圧力容器内雰囲気及び原子炉格納容器内雰囲気が水素の可燃限界に至るまでには、最短で約 30 時間程度の時間的余裕がある。

このことから、他に緊急度の高い復旧作業がある場合は、そちらを優先して実施する。本設備の復旧作業は事前の準備が整い次第、速やかに実施する。

(2) 津波により複数の設備が同時に機能喪失した場合

津波により複数の設備が同時に機能喪失した場合は高台に用意しているディーゼル駆動の窒素ガス分離装置と予備のホース及び取り付け治具を用いて原子炉圧力容器及び原子炉格納容器への窒素供給を再開する。

原子炉圧力容器及び原子炉格納容器への窒素の供給が停止してから、これらの容器内の雰囲気が水素の可燃限界に至るまでは最短でも約 30 時間程度であることから、原子炉圧力容器及び原子炉格納容器の水素爆発を防止することは可能であると考えている。

(3) 地震発生時の対応について

原子炉圧力容器及び原子炉格納容器への窒素の封入ライン (既設配管) の耐震性は以下の表 2-1 の通り。

表 2-1 窒素封入ライン（既設配管）の耐震性

	原子炉压力容器	原子炉格納容器
1号機	原子炉压力容器ヘッドスプレイライン (耐震 S クラス)	不活性ガス系 (耐震 C クラス)
2号機	原子炉压力容器水位計装ライン (耐震 S クラス)	可燃性ガス濃度制御系 (耐震 S クラス)
3号機	原子炉压力容器水位計装ライン (耐震 S クラス)	原子炉格納容器漏えい率検査用予備ライン (耐震 S クラス)

2 / 3号機については、原子炉压力容器及び原子炉格納容器とも耐震 S クラス配管より窒素が供給されており、耐震上問題はない。

1号機については原子炉格納容器への窒素の封入は耐震 C クラス設備である不活性ガス系より行われているため、大きな地震が発生した場合、既設配管の影響が懸念される。

しかし、原子炉压力容器への窒素封入ラインが耐震 S クラスであることから、原子炉压力容器へ封入した窒素が原子炉格納容器側に流入し窒素で満たされるため問題はない。

なお、震度 5 弱以上の地震が発生した場合は巡視点検を実施するとともに、窒素発生装置や窒素供給ホースなどの設備に損傷が見られた場合は、設備の切換やホースの取替を行う等、適切に対応する。

(4) 原子炉注水が停止した場合の対応について

原子炉注水系の機能が喪失し、冷却材が沸騰する状態となった場合、原子炉格納容器内は水蒸気雰囲気となっており、原子炉压力容器内又は原子炉格納容器内で水の放射線分解によって発生した水素・酸素の濃度は極めて低く抑えられていることから、原子炉格納容器内での急激な水素燃焼の発生はない。

しかし、原子炉注水系の機能が復旧し、原子炉の冷却を急激に促進すると、蒸気発生が減少する一方、水の放射線分解による水素・酸素発生は継続するため、原子炉压力容器内及び原子炉格納容器内の水素・酸素濃度が高まり、可燃限界に達する懸念がある。そのため、原子炉冷却が促進される状況下において水素の急激な燃焼を防止することを目的として、水素・酸素濃度が可燃限界に達する懸念が顕在化する前に原子炉压力容器及び原子炉格納容器に窒素を封入する。

なお、原子炉压力容器内又は原子炉格納容器内で水の放射線分解によって発生した水素は、沸騰状況においても、単位時間当たりの発生濃度を窒素封入により 4%以下にしている状況である。そのため、原子炉格納容器内が沸騰状態から急激に冷却されたとしても、蒸気の発生が急激に消滅する前に窒素封入を実施することにより、水素の濃度は可燃限界以下を維持できる。

2.7.3 保守管理

原子炉格納容器内窒素封入設備は、動的機器や外部電源の多重化を実施しているため、これらの機器の単一故障により機能が喪失した場合でも、切替作業により原子炉圧力容器及び原子炉格納容器への窒素封入の再開が可能である。また、仮に複数の機器の同時故障等の何らかの理由で速やかな再開ができない場合でも、窒素封入の停止後、原子炉圧力容器内雰囲気及び原子炉格納容器内雰囲気が水素の可燃限界に至るまでには最短でも約 30 時間の時間的余裕がある。

このように、原子炉格納容器内窒素封入設備については運転継続性の要求は高くないと考えられることから、保守管理については、作業に伴う被ばくを極力低減する観点から、巡視点検等の運転管理を行う中で機器の状態を監視し、異常の兆候が確認された場合に対応を行うこととする。

なお、保守管理を行うにあたっては、異常の確認後に速やかに対応ができるように、必要な予備品、消耗品等を準備しておくこととする。

また、高台窒素ガス分離装置については、構成する設備の健全性を定期的に確認することとする。

2.7.4 配管内の滞留している水素への対応について

1号機の原子炉格納容器に接続されている配管から高濃度の水素が確認された件については、事故発生直後に水-ジルコニウム反応により発生した水素が配管内に留まっているものと考えている。

この配管内に滞留している水素については、着火源が無い場合直ちに爆発するものではないが、今後これらの配管に設備を接続する場合は、必要に応じて、事前に配管内の水素濃度を測定すると共に、高濃度の水素が確認された場合は水素をページするなど適切な処置を行う。

2.8. 添付資料

- 添付資料－1 水素発生量の評価結果について
- 添付資料－2 窒素封入停止時の時間余裕について
- 添付資料－3 水素濃度及び酸素濃度の確認頻度について
- 添付資料－4 原子炉格納容器内窒素封入設備 設計・施工に伴う重要度分類の考え方について
- 添付資料－5 原子炉格納容器内窒素封入設備の構造強度および耐震性について
- 添付資料－6 サプレッションチャンバ内の雰囲気の評価について
- 添付資料－7 原子炉格納容器から押し出される放射性物質による周辺環境への影響について
- 添付資料－8 原子炉圧力容器への窒素封入の必要性について

表 2-2 原子炉格納容器内窒素封入設備主要仕様

(1) 窒素ガス分離装置 A (外部電源)	
台 数	1
容 量	140Nm ³ /h
窒素純度	99.0%以上
電気容量	121kVA
(2) 窒素ガス分離装置 B (外部電源)	
台 数	1
容 量	120Nm ³ /h
窒素純度	99.0%以上
電気容量	75.6kVA
(3) 高台窒素ガス分離装置 (D/G 電源)	
台 数	1
容 量	500 Nm ³ /h
窒素純度	99.0%以上
(4) 高台窒素ガス分離装置用 D/G	
台 数	1
容 量	20kVA
力 率	約 0.8 (遅れ)
電 圧	約 200V
周波数	50Hz
タンク容量	65 l (参考消費量 7 l/h)
(5) 膜式窒素分離装置 A, B, C (D/G 電源)	
台 数	3
容 量	8 Nm ³ /h (1 台あたり)
窒素純度	99.0%以上
電気容量	13.2kW

(6) 膜式窒素分離装置用 D/G

台数	1
容量	125kVA
力率	約 0.8 (遅れ)
電圧	約 200V
周波数	50Hz
タンク容量	900 l (参考消費量 20.6 l/h)

(7) 処理水バッファタンク バブリング用 窒素ガス分離装置 (外部電源)

台数	1
容量	60 Nm ³ /h
窒素純度	99.0%以上
電気容量	47kW

表 2-3 主要配管仕様

名 称	仕 様	
①膜式窒素分離装置から共用ヘッダ A まで	内径 外径 材質 最高使用圧力	19.0mm 29.0mm ゴム (JIS・メーカー規格) 1.0MPa
②窒素ガス分離装置 A から共用ヘッダ A まで	内径 外径 材質 最高使用圧力	25.4mm 36.2mm ゴム (JIS・メーカー規格) 1.0MPa
③窒素ガス分離装置 B から共用ヘッダ B まで	内径 外径 材質 最高使用圧力	25.7mm 36.5mm ゴム (JIS・メーカー規格) 1.5MPa
④共用ヘッダ A から 1 号機 窒素封入点 (AC 系配管) まで	内径 外径 材質 最高使用圧力	50.8mm 68.0mm ゴム (JIS・メーカー規格) 1.0MPa
⑤共用ヘッダ B から 2 号機 原子炉格納容器側ライン窒素封入点 (可燃性ガス濃度制御系の弁間漏えい試験用タップ) まで	内径 外径 材質 最高使用圧力	25.4mm 34.4mm 以上 ゴム (JIS K6332) 1.0MPa
⑥共用ヘッダ B から 2 号機 原子炉圧力容器側窒素ラインの北側二重扉手前まで	内径 外径 材質 最高使用圧力	25.4mm 34.4mm 以上 ゴム (JIS K6332) 1.0MPa
⑦原子炉圧力容器側窒素ラインの北側二重扉手前から窒素封入点 (計装ラック LT-61) まで	内径 外径 材質 最高使用圧力	25mm 34.5mm ゴム (JIS・メーカー規格) 1.0Mpa
⑧共用ヘッダ B から 3 号機原子炉格納容器側ライン窒素封入点 (原子炉格納容器漏えい率試験用予備タップ) まで	内径 外径 材質 最高使用圧力	25.4mm 34.4mm 以上 ゴム (JIS K6332) 1.0MPa
⑨共用ヘッダ B から 3 号機 原子炉圧力容器側窒素ラインの北側二重扉手前まで	内径 外径 材質 最高使用圧力	25.4mm 34.4mm 以上 ゴム (JIS K6332) 1.0MPa
⑩原子炉圧力容器側窒素ラインの北側二重扉手前から窒素封入点 ((計装ラック LT-61)) まで	内径 外径 材質 最高使用圧力	25mm 34.5mm ゴム (JIS・メーカー規格) 1.0Mpa
⑪処理水バッファタンク バブリング用 窒素ガス分離装置から共用ヘッダ B まで	内径 外径 材質 最高使用圧力	25.4mm 37.5mm ゴム (JIS・メーカー規格) 1.0MPa

⑫高台共用ヘッダから共用ヘッダ B まで	内径 外径 材質 最高使用圧力	25mm 34.5mm ゴム (JIS・メーカー規格) 1.0Mpa
⑬高台窒素ガス分離装置から共用ヘッダ C まで	内径 外径 材質 最高使用圧力	50.8mm 73.0mm ゴム (JIS・メーカー規格) 2.0Mpa

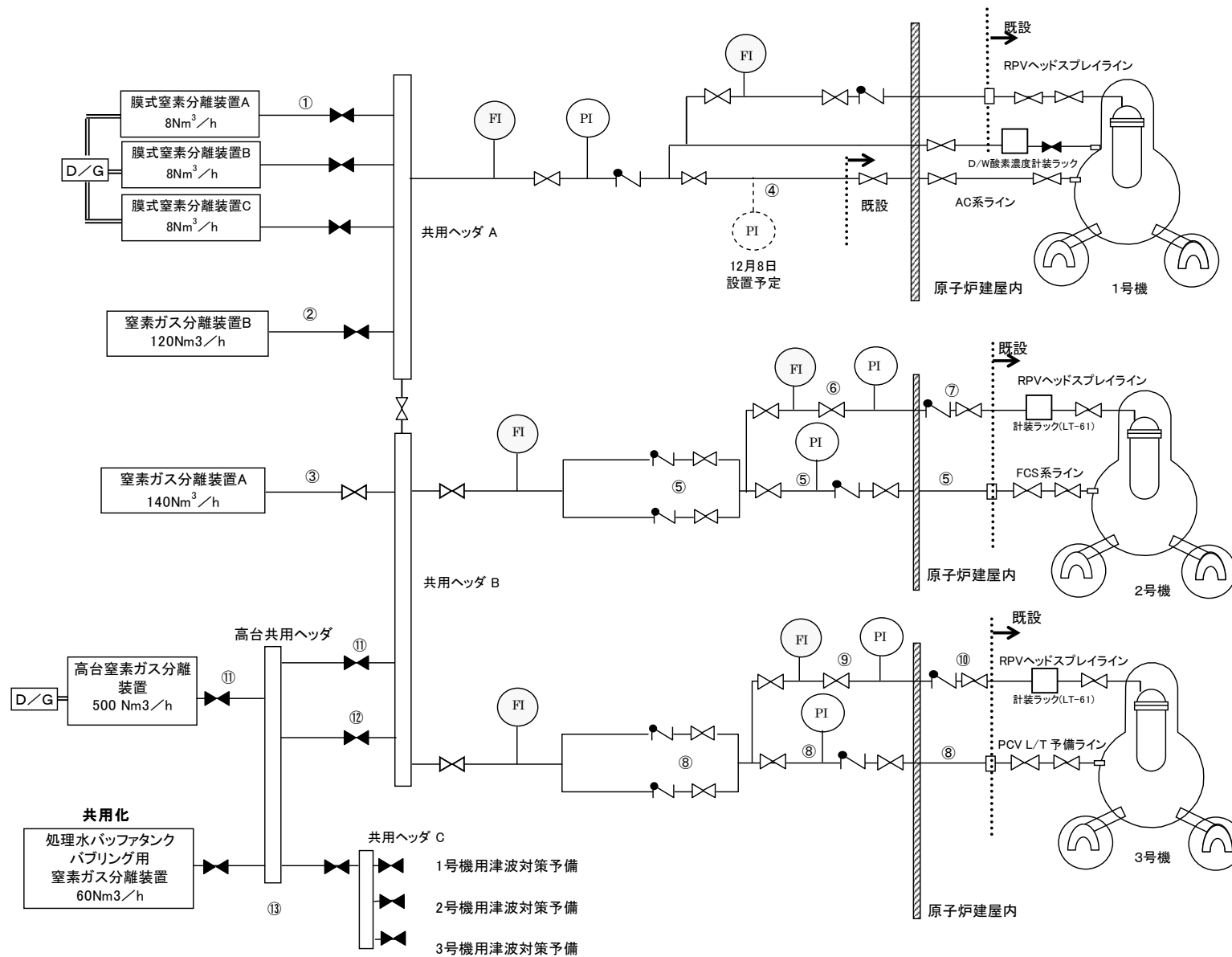


図 2-2 原子炉格納容器内窒素封入設備系統概略図

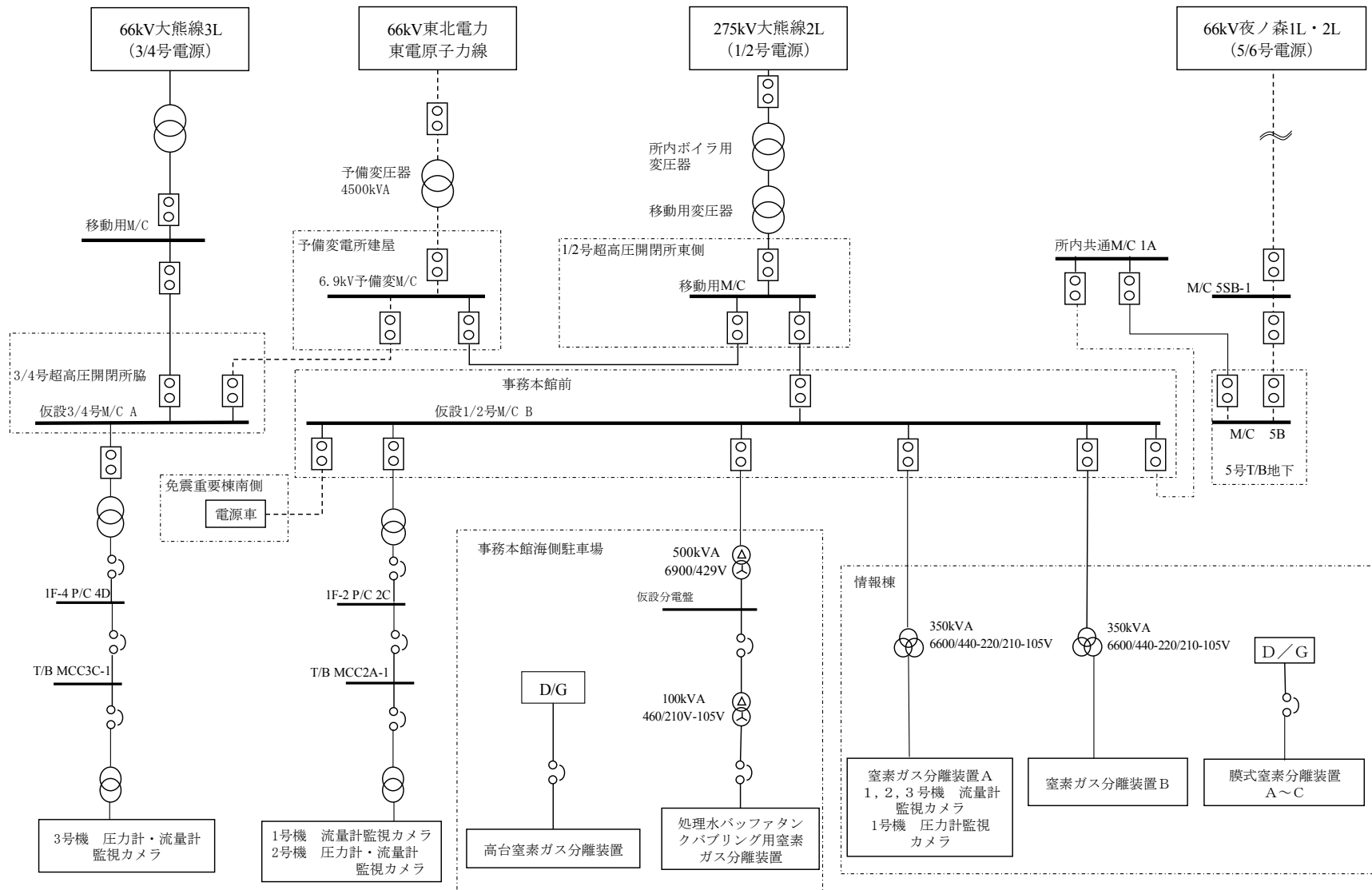


図 2-3 原子炉格納容器内窒素封入設備 電源構成図

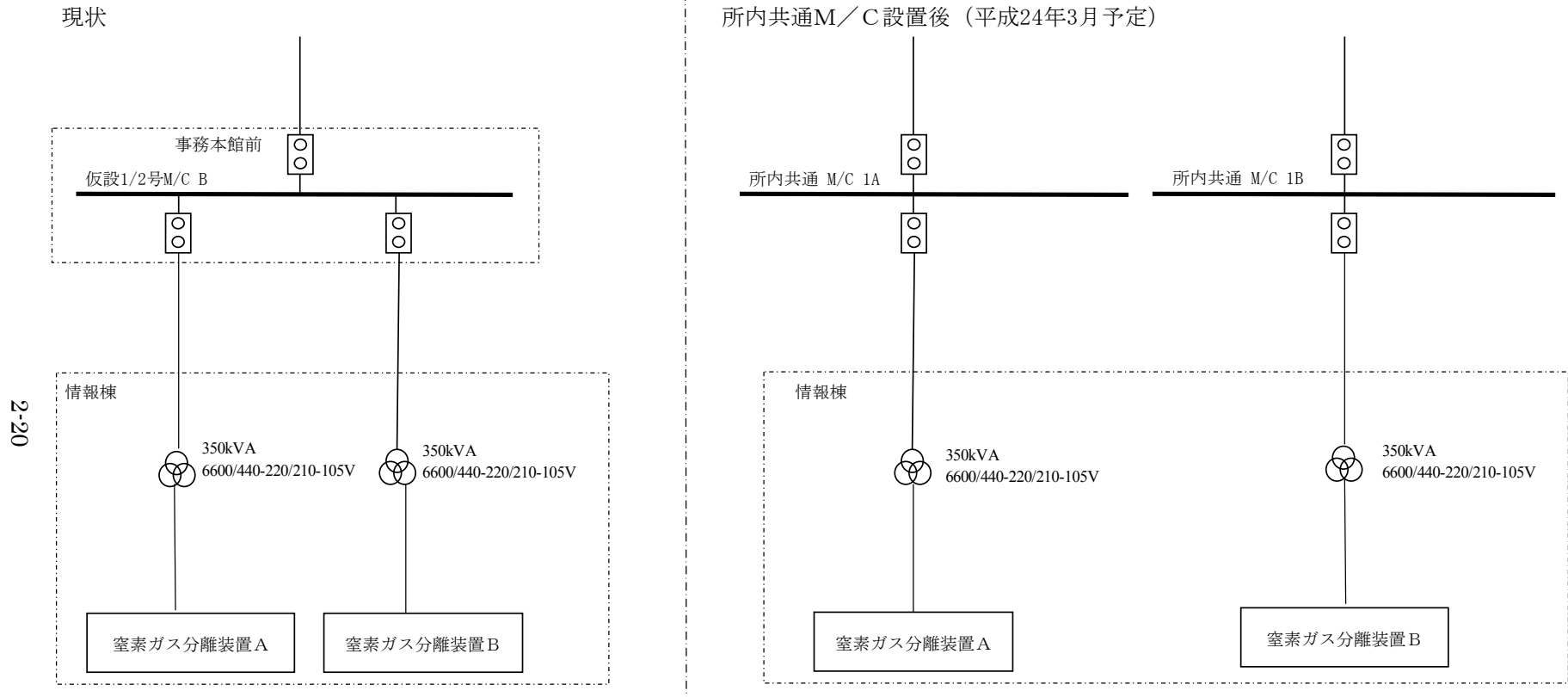


図 2-4 原子炉格納容器内窒素封入設備 電源構成図（今後の予定）

水素発生量の評価結果について

1. はじめに

2号機の原子炉格納容器ガス管理設備については、10月28日の18時の本格運転開始以降、原子炉格納容器内の水素濃度を監視しているが、当初評価していたガス管理設備での水素濃度(2.5%：水蒸気の無し)より高い水素濃度(2.9%：水蒸気の無し)となったため、原子炉格納容器ガス管理設備の保護の観点から、段階的に窒素封入量を増加させ、12月1日時点で水素濃度は0.6%で安定している状態である。

この原因としては、添付資料－8に示すとおり、原子炉圧力容器内に比較的高い濃度の水素が存在し、これが原子炉格納容器へ押し出されたこと等により水素濃度が上昇したと推定している。

原子炉圧力容器に封入した窒素置換が完了した12月4日時点で原子炉格納容器ガス管理設備(窒素封入量：36(Nm³/hr)、抽気流量：40(Nm³/hr))において測定された水素濃度0.5%から算出される単位時間当たりの水素発生量の実測値は、約0.2(Nm³/hr)と算出される。一方、G値およびエネルギー吸収率から算出する水の放射線分解による水素発生量は約0.3(Nm³/hr)となることから、水素発生量の評価手法は、保守的であったと評価している。

そこで、福島第一原子力発電所第2号機原子炉格納容器への窒素封入に係る報告の徴収について(報告)および「福島第一原子力発電所第3号機原子炉格納容器への窒素封入に係る報告の徴収について(報告)」にて使用した評価手法を用いることとする。

なお、事故初期に発生した水-ジルコニウム反応により発生した水素は既に原子炉格納容器(以下、PCV)から漏れ出し、現状は水の放射線分解により水素が発生していると考えられることから、水の放射線分解により発生する水素発生量を評価する。

2. 水素発生量の評価

(1) 評価式

水の放射線分解による水素発生量は次式で計算される。

$$M = P_0 \times (P_t / P_0) \times E \times G / 100 \times \text{換算係数}$$

ここで、

M：可燃性ガス発生割合(lbmol/h)

P₀：原子炉熱出力(MWt)

P_t：崩壊エネルギー(MWt)

P_t/P₀：事故後の原子炉出力割合(崩壊エネルギー)(MW/MWt)

E：エネルギー吸収率(γ線、β線)(-)

G：エネルギー100eVあたりの水の分解量(G値)(分子/100eV)

換算係数：82.2 (eV・lbmol/MW・h・分子) ※

※：1 lbmol=22.4/2.205 Nm³

(2) 評価条件

◇ 事故後の原子炉出力割合 (崩壊エネルギー)

- 事故後、希ガスは原子炉格納容器外に全量放出されたものとし、残りの核分裂生成物が原子炉格納容器外に放出されず放射線分解に寄与するものとする。
- エネルギー吸収率の観点から核分裂生成物の分布として原子炉格納容器液相中とそれ以外の分布を考慮する。ただし、水溶性の CsI 等については全て原子炉格納容器液相中に存在するものと仮定。

◇ エネルギー吸収率

- 原子炉格納容器液相中の核分裂生成物のエネルギー吸収率については、水溶性以外の粒子状のものが存在することも想定され自己遮へいの効果もあると考えられるが保守的に 100% に設定。
- 原子炉格納容器液相中以外の核分裂生成物のエネルギー吸収率については、原子炉格納容器液相中以外の核分裂生成物のうち溶融落下し分散したデブリは電力共同研究の成果(※1)より、デブリ径が大きくなるにしたがってエネルギー吸収率が下がると評価されていることから、自己遮へいを考慮し 10% に設定。

(※1)シビアアクシデントにおける可燃性ガスの挙動に関する研究 (平成 12 年 3 月)

- エネルギー吸収率の高い原子炉格納容器液相中の存在割合を切り上げすることで、保守的な評価条件とした。
- 炉心の状態に関する解析結果と本評価条件での存在割合の関係、及びエネルギー吸収率は次表のとおり。

核分裂生成物	存在位置	存在割合		エネルギー吸収率
		MAAP 解析結果※	評価条件	
ハロゲン	原子炉格納容器液相中	90%	100%	100%
	それ以外	10%	0%	—
固形分	原子炉格納容器液相中	4%	10%	100%
	それ以外	96%	90%	10%

※ 炉心の状態に関する解析結果 (MAAP 解析結果)

5/23 付にて報告した「福島第一原子力発電所 1～3 号機の炉心の状態について」に記載されている炉心の状態に関する解析結果を用いた。今回の評価では、原子炉水

位は燃料域内において維持できていないとして、燃料域以下程度を維持する注水量を仮定した解析（炉内への注水量を厳しめに設定した解析）を用いた。

◇ G 値

水中にヨウ素が存在すると水素と酸素の再結合を阻害する効果があること、及び水素燃焼が懸念されるのは崩壊熱の減少により蒸気発生が停止する状態（非沸騰状態）であることを考慮して、水素の G 値を 0.25 分子/100eV(※2)とする。

なお、α 線放出核種が溶液の状態の場合は、γ 線および β 線より G 値が数倍程度大きくなるという報告がある。しかしながら、α 線放出核種は、デブリに取り込まれていると想定され、その際、上述のとおり、γ 線および β 線では自己遮へい効果によりエネルギー吸収率が 10%と評価されているため、透過力が小さい α 線では自己遮へい効果によりエネルギー吸収率は 1%未満と考えられることから、G 値が大きくなる影響より、エネルギー吸収率が小さくなる影響の方が大きいため、現状の評価方法は保守的と考えられる。

(※2)原子炉設置変更許可申請書

3. 評価結果

水素濃度を 4%以下にする窒素封入量の評価結果を下表および図 1～図 3 に示す。

なお、今後、新たな知見を入手した際には、水素発生量を再評価し、必要窒素封入量を見直すこととする。

		平成 23 年 12 月 6 日	平成 24 年 10 月 17 日	平成 25 年 10 月 17 日	平成 26 年 10 月 17 日
1 号 機	崩壊熱 (MW)	約 0.5	約 0.3	約 0.2	約 0.1
	水素発生量 (Nm ³ /h)	約 0.2	約 0.1	約 0.1	約 0.05
	必要窒素量 (Nm ³ /h)	約 5	約 3	約 2	約 2
2 号 機	崩壊熱 (MW)	約 0.7	約 0.4	約 0.2	約 0.2
	水素発生量 (Nm ³ /h)	約 0.3	約 0.1	約 0.1	約 0.06
	必要窒素量 (Nm ³ /h)	約 7	約 4	約 3	約 2
3 号 機	崩壊熱 (MW)	約 0.7	約 0.4	約 0.2	約 0.2
	水素発生量 (Nm ³ /h)	約 0.3	約 0.1	約 0.1	約 0.06
	必要窒素量 (Nm ³ /h)	約 7	約 4	約 2	約 2

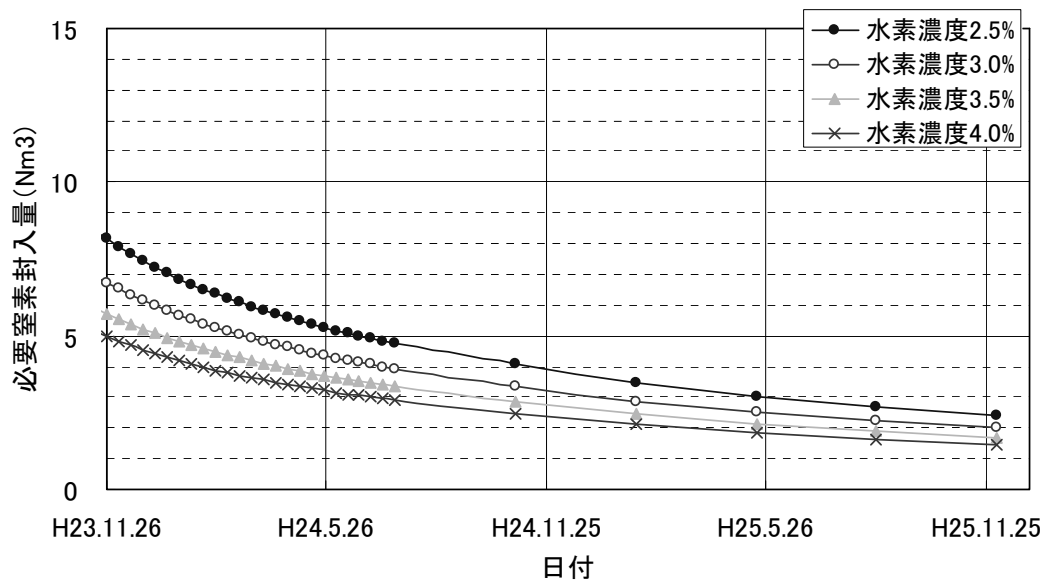


図1 福島第一原子力発電所第1号機 必要窒素封入量の推移

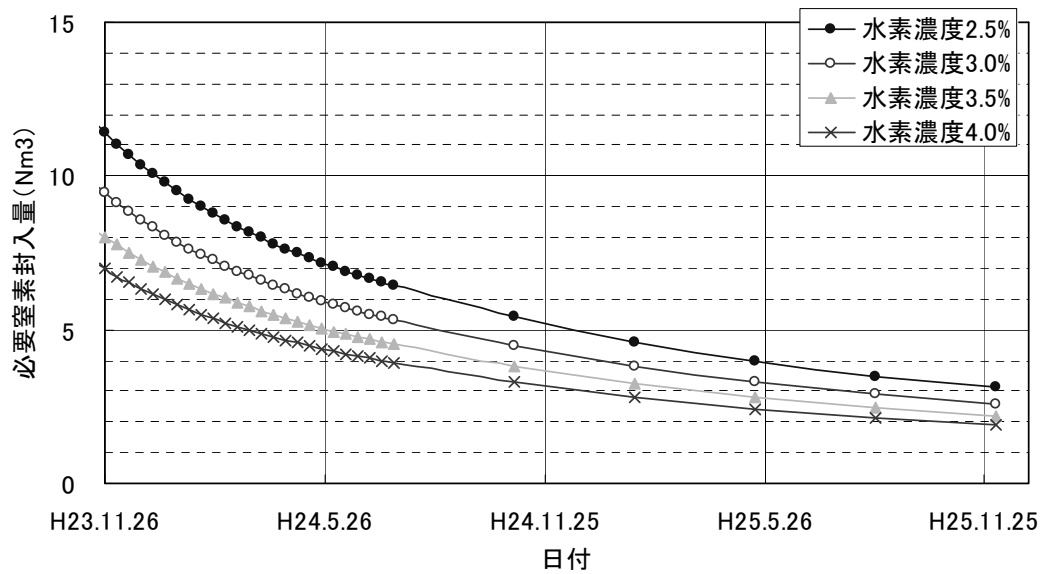


図2 福島第一原子力発電所第2号機 必要窒素封入量の推移

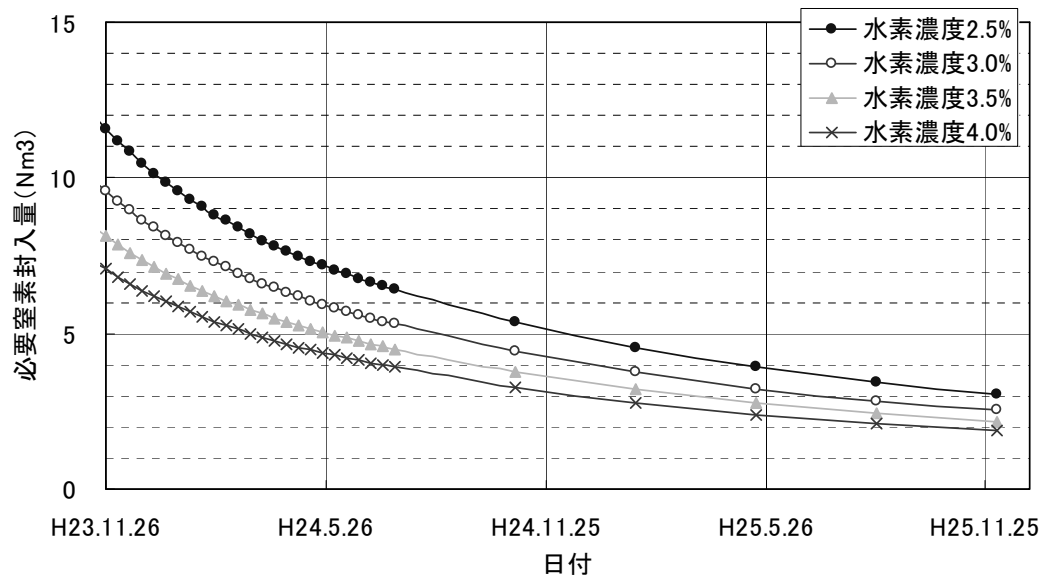


図3 福島第一原子力発電所第3号機 必要窒素封入量の推移

窒素封入停止時の時間余裕について

1. はじめに

原子炉圧力容器および原子炉格納容器は、窒素封入により、低い不活性な雰囲気に保たれている。しかしながら、原子炉圧力容器または原子炉格納容器への窒素の供給が停止した場合、水の放射線分解により発生する水素により、原子炉格納容器内の雰囲気が水素の可燃限界に至ることが想定されることから、以下に窒素の供給を復旧するまでの時間余裕を評価する。

なお、新たな知見を入手した際には、原子炉圧力容器内および原子炉格納容器の水素発生量を再評価し、原子炉圧力容器内および原子炉格納容器への窒素封入量および時間余裕を評価し直すこととする。

2. 時間余裕の評価

(1) 水素発生量について

水素発生量の評価条件は、添付資料－1 で示すとおりであり、平成 23 年 12 月 6 日時点での水素発生量と濃度は表 1 の通りである。

(2) 時間余裕について

● 評価式

窒素封入設備が停止した場合の時間余裕は次式で計算される。

$$T = V \times (4\% - C_{H_2}) / 100 / M_{H_2}$$

T：時間余裕 (hr)

V：原子炉格納容器気相部体積 (m³) または原子炉圧力容器気相部体積 (m³)

C_{H₂}：原子炉格納容器内または原子炉圧力容器内の初期水素濃度 (%)

M_{H₂}：水の放射線分解による単位時間あたりの水素発生量 (m³/hr)

● 評価条件について

- 水の放射線分解により単位時間あたりに発生する水素及び酸素、並びに、単位時間あたりに封入される窒素により、原子炉格納容器気相部または原子炉圧力容器気相部が平衡状態にあるとして、初期水素濃度を設定する。
- 窒素封入設備の停止後は、水の放射線分解により水素及び酸素のみが発生することとし、水素濃度が可燃限界の 4% に到達する時間を評価する。
- 原子炉格納容器の水位は、原子炉格納容器球形部の赤道面 (図 1) にあることとし、原子炉格納容器気相部の体積は、1 号機約 1,900m³、2 号機および 3 号機約 2,600m³ とする。

なお、時間余裕の評価は原子炉格納容器の空間体積を小さく想定するほど厳しくなることから、評価結果が保守的になるよう原子炉格納容器赤道面とした。原子炉格納容器内水位は本評価で想定している赤道面より

低い位置にあると考えており、時間余裕の評価に保守性がある。

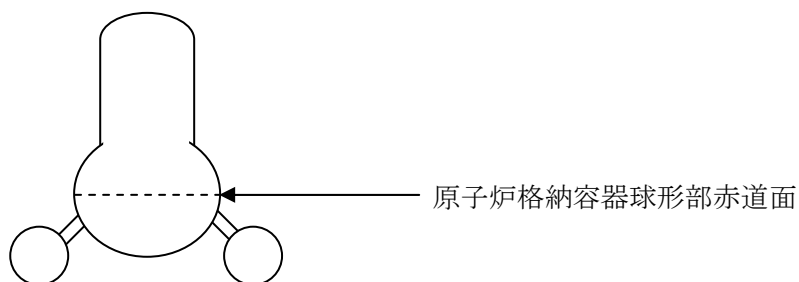


図1 原子炉格納容器概略図

- 原子炉格納容器の時間余裕評価の際は、水の放射線分解による水素の発生場所は、原子炉格納容器内としている。
- 原子炉圧力容器の水位は、ダウンスケールの状態であることから、燃料頂部-5m以下と推定されることから、表1のとおり、原子炉圧力容器気相部の体積は、1号機約190m³、2号機および3号機約420m³とする。
- 原子炉圧力容器の時間余裕評価の際は、水の放射線分解による水素の発生量は、1号機は原子炉圧力容器内に燃料が50%^{*}残っているとし、2、3号機は原子炉圧力容器内に燃料が100%残っているととしている。

※ 1号機は、注水量を変更した際の原子炉圧力容器付近の温度変化が小さく、原子炉格納容器雰囲気温度と同等であったことから、燃料の大部分が原子炉格納容器に存在すると推定される。念のため、1号機は、50%が原子炉圧力容器内に残っているととして評価を実施している。

2・3号機は、注水量を変更した際の原子炉圧力容器付近の温度変化が大きく、燃料の大部分が原子炉圧力容器に残っていると推定されるため、100%が原子炉圧力容器内に残っているととして評価を実施している。

表1 原子炉圧力容器容積について

	1号機	2号機	3号機
原子炉圧力容器容積	約280	約520	約520
燃料頂部-5m体積	約190	約420	約420

- 評価結果について
 - 原子炉格納容器への窒素の供給が停止した場合の時間余裕の評価結果を、表2に示す。
 - 原子炉圧力容器への窒素の供給が停止した場合の時間余裕の評価結果を、表3に示す。
 - 今後、崩壊熱の減少に伴い、放射線エネルギーも減少し、水の放射線分解

による水素の発生量が減少し、窒素の供給が停止した場合の時間余裕が増加することから、窒素封入量および時間余裕を適宜見直していくこととする。

- また、新たな知見を入手した際には、原子炉圧力容器内および原子炉格納容器の水素発生量を再評価し、原子炉圧力容器内および原子炉格納容器への窒素封入量および時間余裕を評価し直すこととする。
- なお、1～3号機の原子炉圧力容器への窒素封入量が10 (Nm³/hr) の場合は、表4に示す時間余裕となることから、窒素封入量に応じて時間余裕を見直し、時間余裕を満足するよう、保安要員による窒素封入設備の運転状態の巡視点検を行う。

表2 原子炉格納容器内での水素発生量と初期水素濃度と時間余裕について
(平成23年12月6日時点)

	1号機	2号機	3号機
水素発生量 (Nm ³ /hr)	約0.2	約0.3	約0.3
窒素封入量 (Nm ³ /hr)	28	26	28
初期水素濃度 (%)	約0.7	約1.1	約1.0
時間余裕 (日)	約12	約11	約11

表3 原子炉圧力容器内での水素発生量と初期水素濃度と時間余裕について

	1号機	2号機	3号機
水素発生量 (Nm ³ /hr)	約0.1	約0.3	約0.3
窒素封入量 (Nm ³ /hr)	15	15	15
初期水素濃度 (%)	約1.0	約1.9	約1.9
時間余裕 (時間)	約63	約31	約30

表4 原子炉圧力容器内での水素発生量と初期水素濃度と時間余裕について

	1号機	2号機	3号機
水素発生量 (Nm ³ /hr)	約0.1	約0.3	約0.3
窒素封入量 (Nm ³ /hr)	10	10	10
初期水素濃度 (%)	約1.0	約1.9	約1.9
時間余裕 (時間)	約56	約18	約17

水素濃度及び酸素濃度の確認頻度について

今後、燃料の冷却がより促進されると、蒸気分圧が低下し相対的に水素、酸素濃度は増加する可能性はあるが、水の放射線分解により発生する水素と酸素の発生量に対して、水素を可燃限界以下にする窒素封入量を継続して封入することで水素濃度及び酸素濃度の抑制がなされている。

窒素封入により水素濃度が抑制され、また、燃料の冷却状態が維持されていれば、追加的な水-ジルコニウム反応や、MCCI による大量の水素発生の可能性はなく、水の放射線分解は崩壊熱の減衰とともに減少していくことから、格納容器内の水素濃度の変動は小さいと考えられる。よって、原子炉格納容器ガス管理設備の水素濃度の監視としては、1回／日の確認を行う。

しかし、2号機原子炉格納容器ガス管理設備導入時には事前の評価と比べて高い水素濃度が確認されたことから、1号機～3号機の原子炉格納容器ガス管理設備の運転時に水素濃度に変動がみられた場合は水素濃度及び酸素濃度を適切な監視頻度で確認することとする。

また、原子炉格納容器ガス管理設備導入後に系統が停止し水素濃度及び酸素濃度が監視できない場合は、窒素の封入量等のパラメータの確認を行い格納容器内水素濃度の評価を行う。

以上

原子炉格納容器内窒素封入設備 設計・施工に伴う重要度分類の考え方について

(１) 安全重要度分類について

「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」及び「安全機能を有する電気・機械装置の重要度分類指針 (JEAG4612)」より、原子炉格納容器内窒素封入設備については以下の分類がなされている。

①原子炉格納容器：MS－１

②不活性ガス系：MS－３

(注：当該系である格納容器内の環境条件を機能要求以前に達成及び維持するための設備であり、状態は事前に検知可能であることから、当該系に対し重要度はクラス３となる。)

今回設置を予定している原子炉格納容器内窒素封入設備は上記範囲のうち②の一部に該当するが、指針上の注記の記載と現状では状況が異なることから、重要度分類について以下の通り再考を行った。

添付資料－２の表－２、３に現在の福島第一１～３号機における原子炉圧力容器及び原子炉格納容器への窒素封入量と想定される水素濃度を示す。現状、各号機の原子炉圧力容器及び原子炉格納容器には窒素の封入が実施されており１２月６日時点において、想定される水素濃度は約０.７～１.９％程度と考えられる。また、この時点において窒素の供給が停止した場合の水素の可燃限界へ至るまでの時間は、短いもので約３０時間程度である。

このことから、現時点における水素爆発のリスクは低く、窒素の封入が停止した場合も水素の可燃限界に至る前に対策を取ることが可能であることから、機器の重要度を従来と同様にMS－３として設計を行う。

また、JEAG4612においては、クラス３の設備についての設計上の考慮の基本的目標を「一般産業施設と同等以上の信頼性を確保し、かつ、維持すること。」としていることから、JISやメーカー標準設計等に基づく設計を行うこととする。

(２) 耐震重要度分類について

「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」及び「原子力発電所耐震設計技術規程 (JEAC4601)」より、原子炉格納容器内窒素封入設備については以下の分類がなされている。

①原子炉格納容器：Sクラス

②不活性ガス系：Cクラス

今回設置を予定している原子炉格納容器内窒素封入設備の耐震クラスについては、(1)にて述べた重要度分類の考え方を考慮し、不活性ガス系と同様に耐震Cクラスとして設計・施工を行うこととする。

(3) 安全確保策について

前述(1)、(2)の通り、原子炉格納容器内窒素封入設備については本設設備と同様の設計を行うが、耐震Cクラスより大きい地震加速度により設備が転倒する恐れがあることから、各設備について固縛等の対策を講ずる。

以上

原子炉格納容器内窒素封入設備の構造強度および耐震性について

1. 窒素ガス分離装置の構造強度および耐震性

(1) 構造強度

窒素ガス分離装置（A）、（B）に用いる容器の一部については、圧力容器構造規格の第二種圧力容器構造規格を適用しており、JIS B8265（圧力容器の構造一般事項）の規格計算を行い、下記の通り必要板厚さを満足することを確認した。よって原子炉格納容器内窒素封入設備の最高使用圧力に十分耐えうる構造強度を有していると判断した。

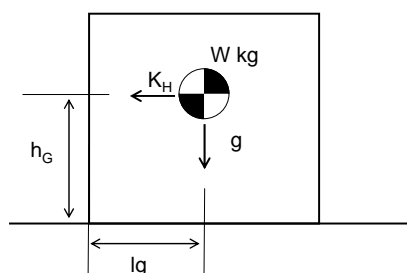
第二種圧力容器 板厚計算結果

設備名		部位	必要板厚 (mm)	使用板厚 (mm)
窒素ガス 分離装置 (A)	吸着槽	胴板	5.56	9
		皿形鏡板	5.86	9
		半楕円形鏡板	4.16	12
		平ふた板	21.9	26
	製品槽	胴板	5.21	6
		皿形鏡板	5.48	6
窒素ガス 分離装置 (B)	吸着槽	胴板	4.86	6
		皿形鏡板	5.11	6
		半楕円形鏡板	3.68	9
		平ふた板	21.9	26
	製品槽	胴板	4.86	6
		皿形鏡板	5.11	6

(2) 耐震性

窒素ガス分離装置（A）、（B）については、「建築設備耐震設計・施工指針（2005年版）」を参考とし、静的地震力を用いて、耐震設計審査指針上の耐震 C クラス相当の地震力（ $1.2C_i = 0.24$ ）にて設備が転倒しないことの評価を行い、以下の通り耐震性を有することを確認した。

・設備の転倒評価



- K_H 水平方向設計震度
- W 機器重量
- g 重力加速度
- h_G 据付面から重心までの距離
- l_g 転倒支点から機器重心までの距離

地震によるモーメント： $M_1 = W \times g \times K_H \times h_G$

自重によるモーメント： $M_2 = W \times g \times \ell_g$

窒素ガス分離装置 転倒評価結果

設備名称	地震によるモーメント M_1 [N・m]	自重によるモーメント M_2 [N・m]	評価
窒素ガス分離装置 (A)	4920	14023	転倒しない
窒素ガス分離装置 (B)	3602	9169	転倒しない

2. バッファタンクの構造強度および耐震性

(1) 構造強度

バッファタンクについては、圧力容器構造規格の第二種圧力容器構造規格を適用しており、JIS B8265（圧力容器の構造一般事項）の規格計算を行い、下記の通り必要板厚さを満足することを確認した。よって原子炉格納容器内窒素封入設備の最高使用圧力に十分耐えうる構造強度を有していると判断した。

第二種圧力容器 板厚計算結果

設備名称	部位	必要板厚 (mm)	使用板厚 (mm)
バッファタンク (A)	胴板	7.72	9
	鏡板	8.19	9
バッファタンク (B)	胴板	6.47	9
	鏡板	6.84	9

(2) 耐震性

窒素ガス分離装置 (A)、(B) については、「建築設備耐震設計・施工指針 (2005 年版)」を参考とし、静的地震力を用いて、耐震設計審査指針上の耐震 C クラス相当の地震力 ($1.2C_i = 0.24$) にて設備が転倒しないことの評価を行い、以下の通り耐震性を有することを確認した。

バッファタンク 転倒評価結果

設備名称	地震によるモーメント M_1 [N・m]	自重によるモーメント M_2 [N・m]	評価
バッファタンク (A)	1730	2515	転倒しない
バッファタンク (B)	714	942	転倒しない

3. ゴムホース

(1) 構造強度

ゴムホースは設計・建設規格に記載がない材料であるが、通常運転状態における漏えい確認試験を行い、有意な変形や漏えいがないことを確認していることから、必要な構造強度を有しているものと判断する。

(2) 耐震性

ゴムホースは、フレキシビリティを有しており、地震変位による有意な応力は発生しないと考えられる。

サブプレッションチャンバ内の雰囲気の評価について

1. 概要

サブプレッションチャンバ内の雰囲気については、サブプレッションチャンバ内での水素の蓄積量が少ないこと、および、サブプレッションチャンバ内はウェットな状態であり、着火源がないことから、構造物の破損を生じるような急激な燃焼の可能性は小さいと想定される。

2. サプレッションチャンバ内の状態について

- 事故直後に発生した水素は、ウェットウェルベント、もしくはドライウェルからのリークに伴い、既に放出されたと想定される。ウェットウェルベント時にはサブプレッションチャンバの上部に滞留すると考えられるが、以下の理由から、溜まっている水素の量は少ないものと想定される。
 - ◇ 仮にサブプレッションチャンバからのリークパスが存在すれば、水素や酸素がサブプレッションチャンバから流出することから、サブプレッションチャンバでは水素はほとんど蓄積されていないと想定される。
 - ◇ 一方、リークパスが無いことを仮定すれば、これまでの注水によりサブプレッションチャンバは満水に近い状態と考えられ、気相部がほとんど無いと想定される。
- 水の放射線分解により発生する水素の量は非常に少ない状態であり、サブプレッションチャンバ内にはほとんど蓄積されていないと考えられる。
 - ◇ サプレッションチャンバは、1～3号機全てにおいて水温が100℃未満であり、崩壊熱も減少していることから、水の放射線分解により発生する水素の発生量は非常に少ない状態である。
 - ◇ このような状況下で、仮にサブプレッションチャンバからのリークパスが存在すれば、水素や酸素がサブプレッションチャンバから流出すること、および、サブプレッションチャンバ内のFPの存在量が減少し、水の放射線分解による水素の発生量は非常に少なくなることから、サブプレッションチャンバでは水素はほとんど蓄積されていないと想定される。
 - ◇ 一方、リークパスが無いことを仮定すれば、これまでの注水によりサブプレッションチャンバは満水に近い状態と考えられ、気相部がほとんど無いと想定される。

以上

原子炉格納容器から押し出される放射性物質による周辺環境への影響について

1. 原子炉格納容器から放出される気体の増加について

窒素封入の実施により、窒素封入量分だけ、原子炉格納容器内から放出される気体が増加すると想定される。そこで、窒素封入分が周辺環境に与える影響について以下に示す。

2. 窒素封入による環境への影響について

以下のように原子炉圧力容器内及び原子炉格納容器内の放射性物質の移行挙動を踏まえると、窒素封入により放射性物質が新たに原子炉格納容器気相部に移行することはない。よって、放射性物質の単位時間当たりの放出量は変わらないため、窒素封入により原子炉格納容器から押し出される気相部の増加による周辺環境への影響はないと想定している。

● 事故初期に燃料から放出された放射性物質

窒素封入により、事故初期の燃料から放出された放射性物質が環境中に追加放出されることはない。

- 揮発性の放射性物質（希ガス等）はその大部分が原子炉格納容器外へ放出されている。
- エアロゾル状のものは沈着や沈降等のメカニズムにより大部分が原子炉圧力容器や原子炉格納容器、あるいは炉内構造物などに沈着している、若しくは液相に移行している。

● デブリからの放射性物質の追加放出

窒素封入の影響により、デブリから放射性物質が追加放出されることはない。

- 沸点が低い放射性物質は、事故初期の燃料熔融過程において大部分が放出されており、デブリ内にはほとんど残っていないため、追加放出はない。
- 現状、原子炉への継続的な注水によりデブリは冷却が維持されている。窒素封入は、デブリの冷却状態を大きく変化させるものではないことから、現状の注水が維持されている限りデブリの温度上昇とそれに伴う沸点の高い放射性物質の追加放出はない。

● 原子炉圧力容器・格納容器や炉内構造物表面に沈着している放射性物質

窒素封入の影響により、原子炉圧力容器・格納容器や炉内構造物表面に沈着している放射性物質が追加放出されることはほとんどない。

- 沈着している放射性物質自身の持つ崩壊熱により加熱されることによる再蒸発、蒸気圧に相当する量の気相への移行、あるいは炉内でデブリ冷却に伴い発生する蒸気に同伴し再浮遊することで気相部へ移行することが考えられる。
- 現状、測定されている範囲内では、原子炉圧力容器構造材温度および原子炉格納容器内温度は 100℃程度以下である。代表的なセシウム化合物である CsOH の沸点は約 990℃であることから、再蒸発によって気相部へ移行することはない。

- また、CsOH の蒸気分圧は、雰囲気温度の上昇とともに増加するが、水蒸気分圧 (1atm) と比較し極めて小さい (100°Cにおける CsOH の蒸気分圧: 約 3×10^{-15} atm) ことから、窒素封入により、気相部への移行量の増加は無視できる。
- シビアアクシデント時の再浮遊に関する実験*)において、気相の流速が 20m/s 程度では再浮遊しない結果が得られている。現在の崩壊熱全てが蒸発に使われていると仮定し計算される最大蒸気発生量(約 1500m³/h)を仮定しても、シュラウド (断面積約 15m²) を通過する場合の蒸気の流速は約 3cm/s であることから、この程度の蒸気流速で原子炉圧力容器内面や炉内構造物に沈着した放射性物質が再浮遊することはない。

*)JRC, "ASTEC V1.3 Code Assessment on the STORM Aerosols Mechanical Resuspension Tests", EUR 23233 EN-2008.

- 液相中および濡れた原子炉格納容器内壁面の水に溶け込んでいる放射性物質の気相中への移行については、周辺環境への被ばくに最も大きな影響を与えるセシウムに着目すると、代表的なセシウム化合物である CsOH は溶解度が大きい、窒素封入により液相の温度を大きく変化させるものではないことから、新たに気相中へ移行する量は無視できる。
- 液相中に溶け込んでいる CsI が放射線分解することでヨウ素が気相中へ移行する。気相中への移行量は液相の温度の上昇とともに増加するが、窒素封入が液相の温度を大きく変化させるものではないことから、窒素封入により気相中への移行量が増加することはない。
- 窒素には原子炉格納容器壁面での蒸気の凝縮を阻害する効果 (以下、蒸気凝縮阻害効果という) がある。しかしながら、1号機から3号機までの原子炉格納容器への窒素封入開始時において、モニタリングポストに優位な変動が無かったこと、および、蒸気の発生量が減少していく状況であることから、蒸気凝縮阻害効果により、原子炉格納容器内から放出される放射性物質の放出量は、ほとんど変化しないと想定している。
- 1号機から3号機までの原子炉圧力容器への窒素封入開始時においても、モニタリングポストに優位な変動は無かった。

以上

原子炉圧力容器への窒素封入の必要性について

1. 概要

2号機の原子炉格納容器ガス管理設備については、10月28日の18時の本格運転開始以降、原子炉格納容器内の水素濃度を監視しているが、当初評価していたガス管理設備での水素濃度(2.5%：水蒸気なし)より高い水素濃度(2.9%：水蒸気なし)となったため、段階的に窒素封入量を増加させるとともに、原子炉格納容器ガス管理設備の抽気量を増加させることにより、12月4日時点で、水素濃度は0.5%で安定している状態である。

この原因については、原子炉圧力容器内に比較的高い濃度の水素が存在し、これが原子炉格納容器へ押し出されたこと等により水素濃度が上昇したと推定している。

今後、冷却が進むと、蒸気の割合が減少し、水素濃度が高くなっていくことが推定されるため、原子炉圧力容器に直接窒素を封入し、水蒸気がない状態においても水素の可燃限界以下とし、水素の燃焼が発生しないよう管理する。

2. 2号機の水素濃度上昇のメカニズムについて

2.1. 2号機ガス管理設備における水素濃度の推移について

原子炉格納容器ガス管理設備における水素濃度と測定水素量積算値の推移は、図1のとおりとなっている。一時的に水素濃度が上昇しているが、12月1日時点で0.6%と安定していることから、原子炉圧力容器内に比較的高い濃度の水素が存在していたものと推定している。

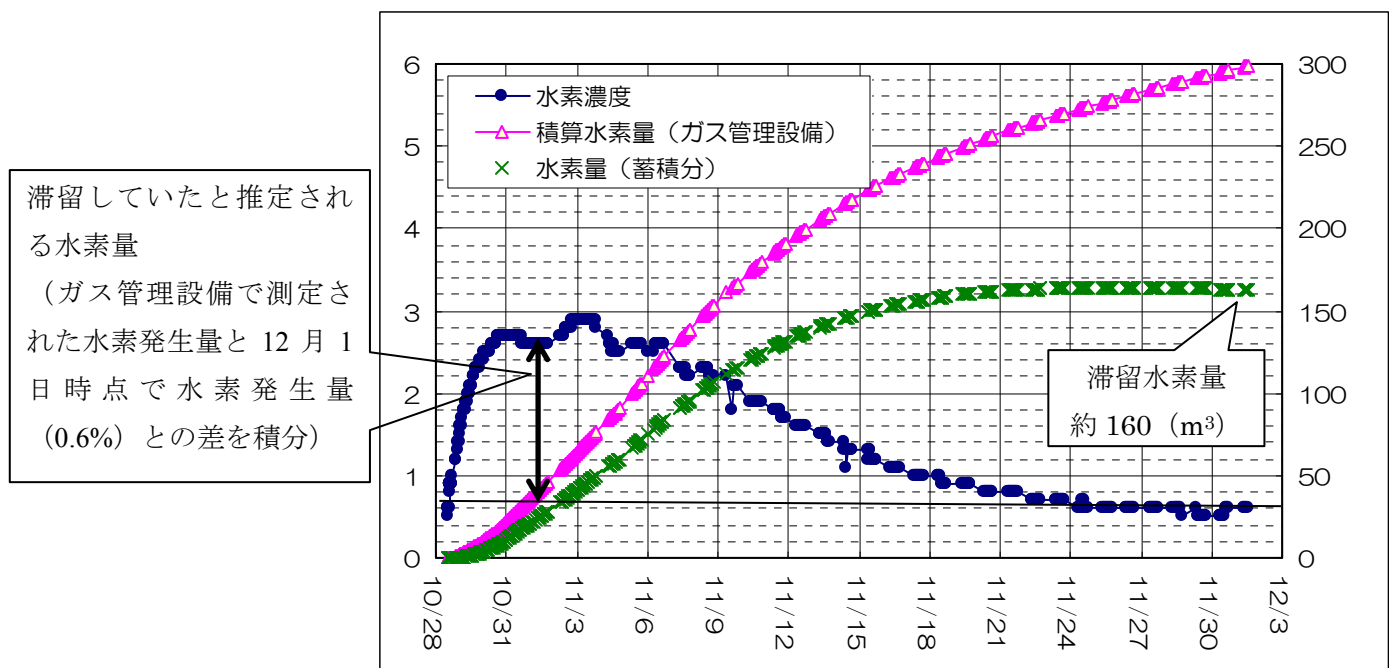


図1 原子炉格納容器ガス管理設備において測定された水素濃度および積算値の推移

2.2. 原子炉圧力容器内および原子炉格納容器内の水素の滞留（蓄積）について

2.1.のとおり、原子炉格納容器ガス管理設備にて測定された水素濃度から算出される原子炉圧力容器および原子炉格納容器に滞留していたと計算される水素量は、約160 (Nm³) となっている。

そこで、滞留していたと算出された水素量が存在可能な部位について纏めたところ、表1とおりとなった。表1の②に示すとおり原子炉圧力容器内のみに蓄積していた、または、表1②及び⑤に示すとおり、原子炉圧力容器および原子炉格納容器の上部（原子炉格納容器トップヘッド）に蓄積していたと推定することが可能である。

水素滞留量=水素の積算発生量-12月1日時点の水素発生量から算出した積算発生量

$\Sigma \{ (\text{水素濃度}) \times (\text{流量※}) \times (\text{測定時間}) \}$ <p>※排気量と窒素封入量の多い方</p>	$(\text{現在の水素濃度}) \times (\text{流量※}) \times (\text{ガス管理設備運転時間})$ <p>※排気量と窒素封入量の多い方</p>
---	---

表1 各部位における滞留可能な水素量について

	場所	容積	条件	水素滞留量	可能性
①	原子炉圧力容器内	520m ³ と仮定	90℃の蒸気分圧※に相当する蒸気量が存在すると仮定	約110Nm ³	△
②	原子炉圧力容器内	520m ³ と仮定	80℃の蒸気分圧※に相当する蒸気量が存在すると仮定	約170Nm ³	○
③	原子炉圧力容器内	520m ³ と仮定	70℃の蒸気分圧※に相当する蒸気量が存在すると仮定	約210Nm ³	△
④	原子炉格納容器内	3,000m ³ と仮定	水素濃度2.9%→0.6%を仮定	約50Nm ³	×
⑤	原子炉格納容器内 (原子炉格納容器ガス管理設備抽口上部)	1,600m ³ と仮定	水素濃度2.9%→0.6%を仮定	約30Nm ³	○
⑥	原子炉格納容器トップヘッド	約160m ³	水素濃度100%を仮定	約120Nm ³	△

※蒸気分圧は90℃約70kPa、80℃約47kPa、70℃約31kPaを使用。(出典：理科年表)

2.3. 原子炉格納容器ガス管理設備における水素濃度の上昇について

原子炉格納容器ガス管理設備起動し数時間後から、原子炉格納容器ガス管理設備における水素濃度が上昇し始めている。これは、原子炉圧力容器内に比較的高い濃度の水素が存在し、これが原子炉格納容器へ押し出されたこと等により水素濃度が上昇したと推定した。

- 図2に示すとおり、原子炉格納容器の圧力が数日かけて、約21(kPa)から約8(kPa)に変化したため、この差圧分(約 50Nm^3 (原子炉圧力容器内温度 80°C で差出):水素量約 20Nm^3 (80°C の蒸気圧分(約 47kPa)の蒸気が存在すると仮定))が原子炉圧力容器から原子炉格納容器に押し出され、水素濃度が上昇したと推定している。
- 原子炉格納容器ガス管理設備における水素濃度の上昇が比較的最初から、原子炉圧力容器下部から漏洩した水素を測定したと推定している。

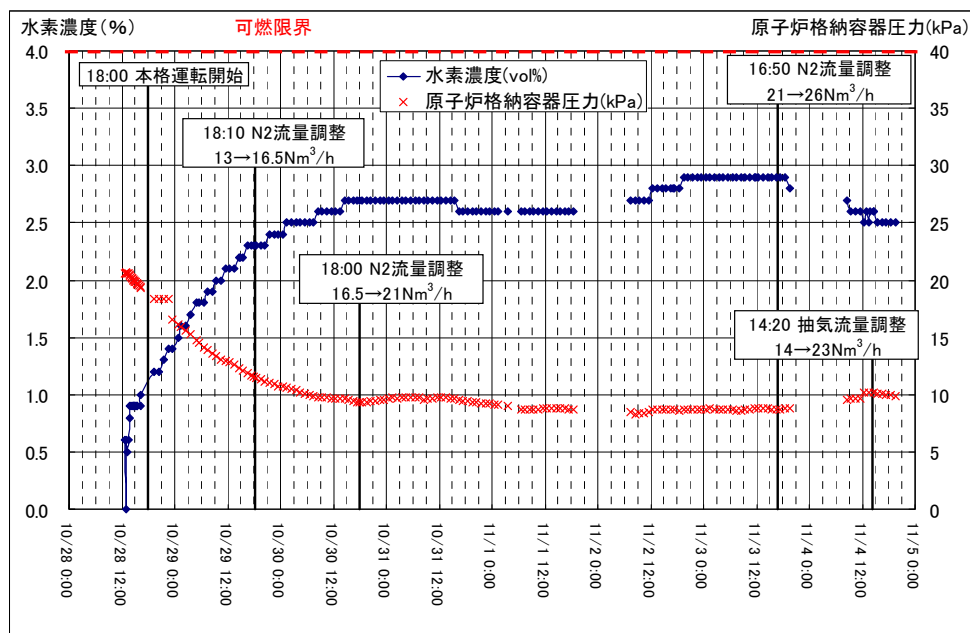


図2 水素濃度と原子炉格納容器圧力の推移

2.4 原子炉格納容器ガス管理設備起動による原子炉格納容器内の流れの変化について

原子炉格納容器ガス管理設備起動前は、2.4.1および図3に示すとおり、原子炉格納容器に封入された窒素が、原子炉格納容器トップフランジ部で酸素・水素・蒸気と混ざり、大気に流出していたと推定している。

一方、原子炉格納容器ガス管理設備起動後は、2.4.2および図4に示すとおり、原子炉格納容器トップフランジ部から大気に流出していた酸素・水素・蒸気および窒素が、原子炉格納容器胴部に引き込まれる流れが変わり、原子炉圧力容器および原子炉格納容器内で発生した水素および酸素の大部分が、ガス管理設備に抽気されたことにより水素濃度が上昇したと推定している。

2.4.1. 原子炉格納容器ガス管理設備導入前のガスの流れ (推定)

- ① 原子炉圧力容器内で発生した蒸気、酸素、水素が原子炉圧力容器上部のフランジ部および原子炉圧力容器下部の漏えい孔から原子炉格納容器に流出する。
- ② 原子炉格納容器トップヘッドのガスは、原子炉格納容器トップヘッドフランジ部から大気へ放出、および原子炉格納容器バルクヘッドプレート上のマンホールから原子炉格納容器胴部へ流出する。
- ③ 原子炉格納容器胴部のガスは、電気・計装ペネ等から大気へ流出する。

2.4.2. 原子炉格納容器ガス管理設備導入後のガスの流れ (推定)

- ① 原子炉圧力容器内で発生した蒸気、酸素、水素が原子炉圧力容器上部のフランジ部および原子炉圧力容器下部の漏えい孔から原子炉格納容器に流出する。
- ② 原子炉格納容器ヘッド部のガスは、原子炉格納容器ガス管理設備により引張られることから、主に、原子炉格納容器バルクヘッドプレート上のマンホールから原子炉格納容器胴部へ流出する。なお、原子炉格納容器トップヘッドフランジ部から大気へも若干流出していると推定している。
- ③ 原子炉格納容器胴部のガスは、原子炉格納容器ガス管理設備にて抽気される。

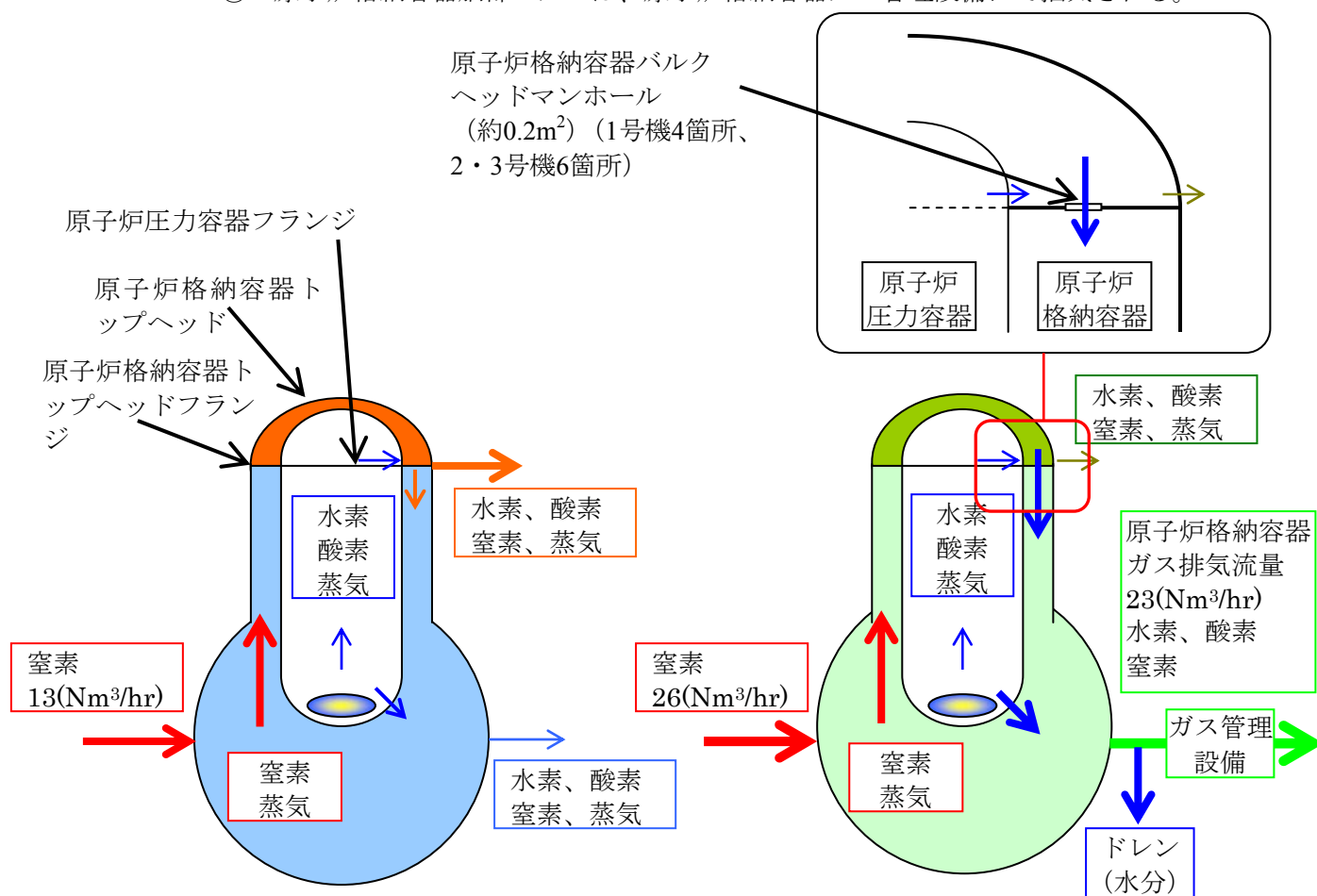


図3 原子炉格納容器ガス管理設備起動前

図4 原子炉格納容器ガス管理設備起動後

3. 原子炉格納容器内の水素濃度分布について

原子炉格納容器の状態を確認するために、原子炉圧力容器から放出されるガスを水素、酸素および蒸気のみとして、1～3号機の水素濃度分布の解析を実施した。原子炉圧力容器に窒素を封入しない状態においては、原子炉格納容器内では、原子炉格納容器トップヘッド部には2～3%程度の水素が溜まっている可能性がある。

- ① 原子炉圧力容器に窒素を封入する前の1～3号機の定常状態においては、原子炉格納容器上部で水素濃度が2～3%程度となり、原子炉格納容器内の水素濃度は、可燃限界以下となっている解析結果を得た。
- ② 2号機の原子炉格納容器ガス管理設備で2.9%を測定した過渡状態においては、原子炉格納容器上部で水素濃度が約4%、酸素濃度が約2%となり、原子炉格納容器内は、可燃限界以下となっている解析結果を得た。

4. 水素発生量評価の妥当性について

図1に示すとおり、12月4日時点で原子炉格納容器ガス管理設備において測定された水素濃度（窒素封入量：36 (Nm³/hr)、抽気流量：40 (Nm³/hr))は0.5%であったことから、単位時間当たりの水素発生量は、約0.2 (Nm³/hr)と計算される。

一方、報告徴収時の手法により水の放射線分解により単位時間当たりに発生する水素量は、約0.3 (Nm³/hr)であることから、G値とエネルギー吸収率から計算される水素の発生量は、原子炉格納容器ガス管理設備にて測定された水素濃度と比較し、保守的であると評価した。

5. 原子炉圧力容器内の水素濃度について

原子炉圧力容器の崩壊熱を除去するために注水を行っているが、原子炉圧力容器には十分な水位が形成されていないことから、原子炉圧力容器から原子炉格納容器への漏れいがあるものと推定していた。このため、原子炉格納容器に封入している窒素の効果が原子炉圧力容器内にも及んでいるものと推定していた。

一方、先般2号機で原子炉格納容器ガス管理設備を起動した際、比較的高い濃度の水素が検出された。これは、原子炉格納容器に封入していた窒素が原子炉圧力容器内には十分行き渡っておらず、原子炉圧力容器内の比較的高い濃度の水素を原子炉格納容器ガス管理設備で抽出したものと考えられる。

原子炉格納容器から原子炉圧力容器への窒素の流れ込みがないとすると、原子炉圧力容器内は、水の放射線分解による水素および酸素と飽和蒸気圧分の水蒸気のみが存在することになり、このまま原子炉圧力容器の冷却が進み水蒸気の発生量が減少すると、水素および酸素の濃度が上昇すると考えられる。

そこで、原子炉圧力容器内に比較的高い濃度の水素が存在する可能性があるため、

原子炉圧力容器内に直接窒素を封入し、蒸気がない状態においても水素濃度が可燃限界以下となるように管理を行うこととした。

6. 原子炉圧力容器への窒素封入時の水素濃度の変化について

2号機において、原子炉圧力容器に窒素を封入した際の水素濃度の変化は、図5の通りである。

原子炉格納容器ガス管理設備の水素濃度は0.6%から0.5%に低下傾向であったこと、および、12月1日から5(Nm³/hr)で、12月2日から10(Nm³/hr)で原子炉圧力容器頂部から窒素を封入しており、12月4日時点で原子炉圧力容器体積の520(m³)以上の窒素を封入していることから、原子炉圧力容器の窒素による置換が十分になされたと推定している。

なお、この間、原子炉格納容器ガス管理設備による抽気流量を23(Nm³/hr)から39(Nm³/hr)に増加させている。したがって、原子炉格納容器ガス管理設備における水素濃度から算出される水素発生量は、原子炉圧力容器への窒素封入前の約0.16(Nm³/hr)(窒素封入量26(Nm³/hr)、水素濃度0.6%)から最大で約0.23(Nm³/hr)(抽気量39(Nm³/hr)、水素濃度0.6%)に増加しており、積算で約3(Nm³)が原子炉圧力容器から押し出された可能性がある。

一方、1・3号機は11月30日に原子炉圧力容器頂部への窒素封入を5(Nm³/hr)で開始しており、1号機は12月3日時点で原子炉圧力容器体積の280(m³)以上の窒素を、3号機は12月5日時点で原子炉圧力容器体積の520(m³)以上の窒素を封入していることから、原子炉圧力容器の窒素置換は十分になされていると推定している。

以上より、今後冷却が進み、蒸気がなくなったとしても、水素濃度は可燃限界以下に抑えられていると推定している。

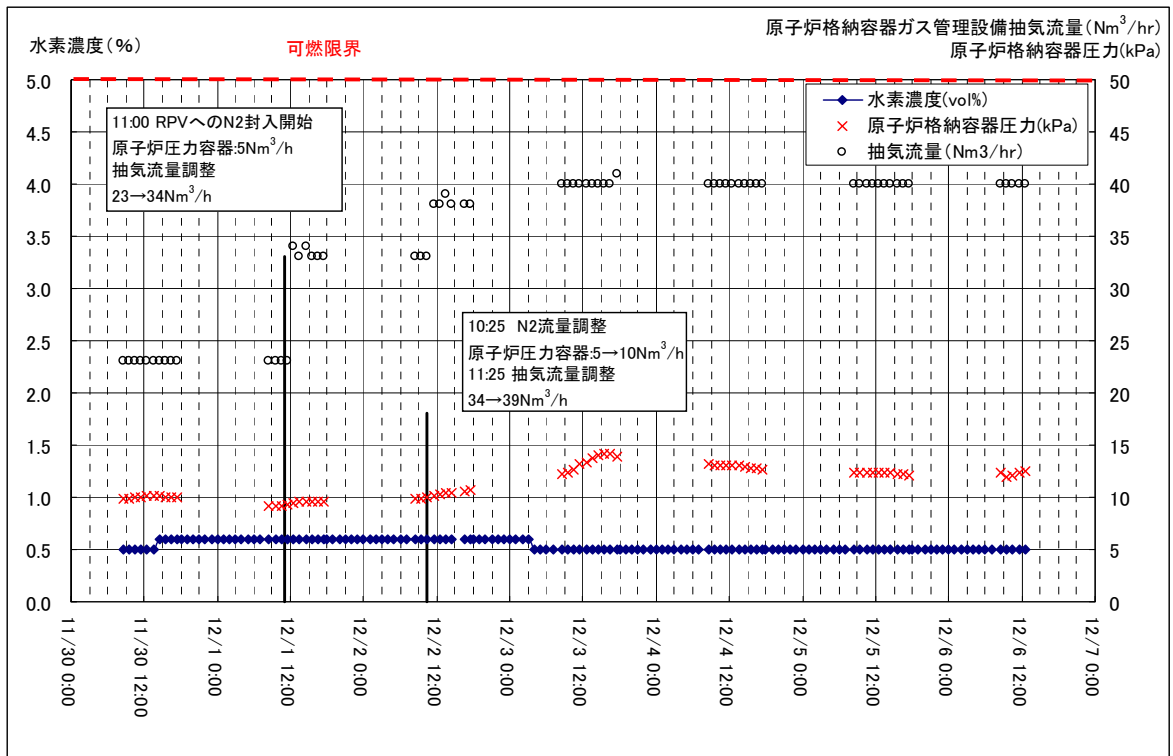


図5 水素濃度、原子炉格納容器圧力および原子炉格納容器ガス管理設備抽気流量の推移

7. 原子炉圧力容器への窒素封入後の変化について

原子炉圧力容器への窒素封入については、耐震Sクラス配管であり、地震においても健全であったと推定され、1～3号機の窒素封入ラインの圧力計および原子炉圧力容器への封入ラインの流量計が変動したことから、窒素が封入されていると評価している。

また、その他、1～3号機の原子炉圧力容器内に窒素が封入された影響が以下のとおり現れたと考えている。

- 1号機では、図6に示すとおり、原子炉圧力容器への窒素封入後、全体的に緩やかに温度が低下したことから、窒素封入による影響と推定している。
- 2号機では、図7に示すとおり、スタッドボルト、原子炉圧力容器胴フランジ、給水ノズルの温度が低下傾向を示したこと、および図5に示すとおり、原子炉格納容器ガス管理設備の水素濃度が低下傾向でことから、窒素封入による影響と推定している。
- 3号機では、図8に示すとおり、原子炉圧力容器上蓋フランジ、ペローシール温度が低下したことから、窒素封入による影響と推定している。

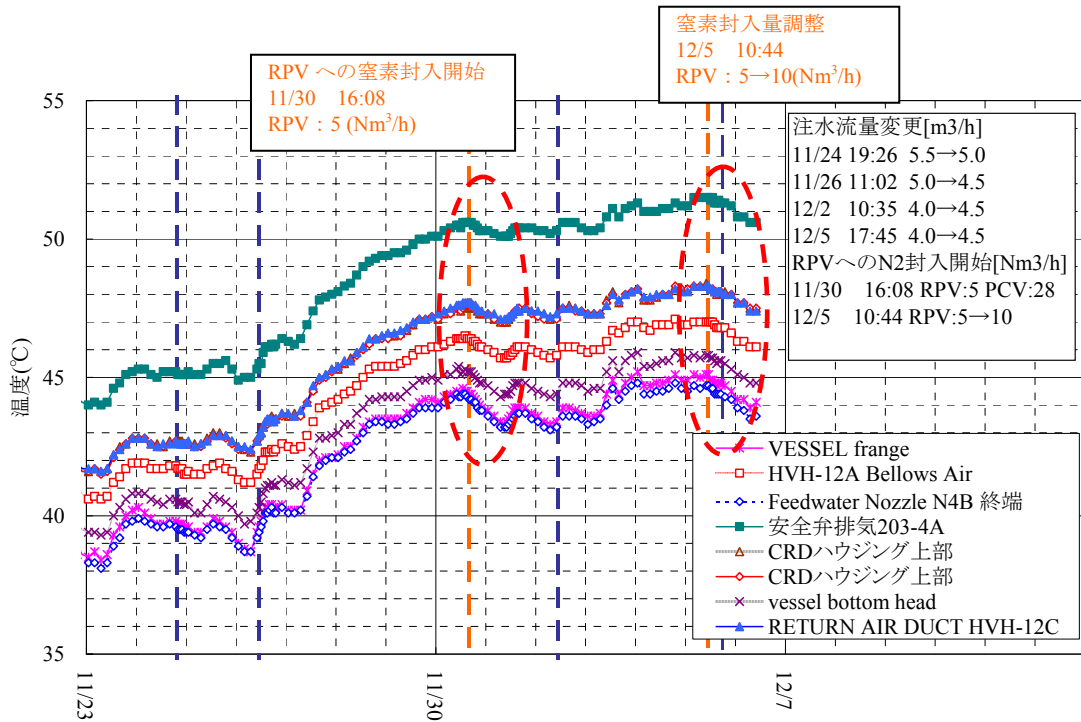


図6 1号機の原子炉圧力容器への窒素封入時の温度変化について

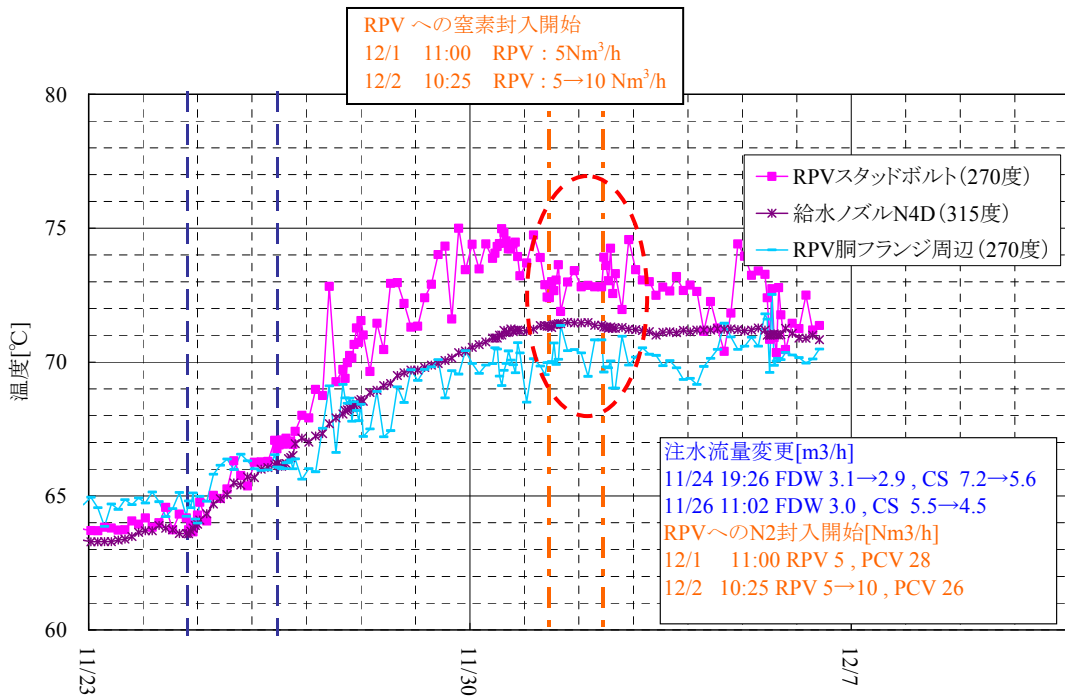


図7 2号機の原子炉圧力容器への窒素封入時の温度変化について

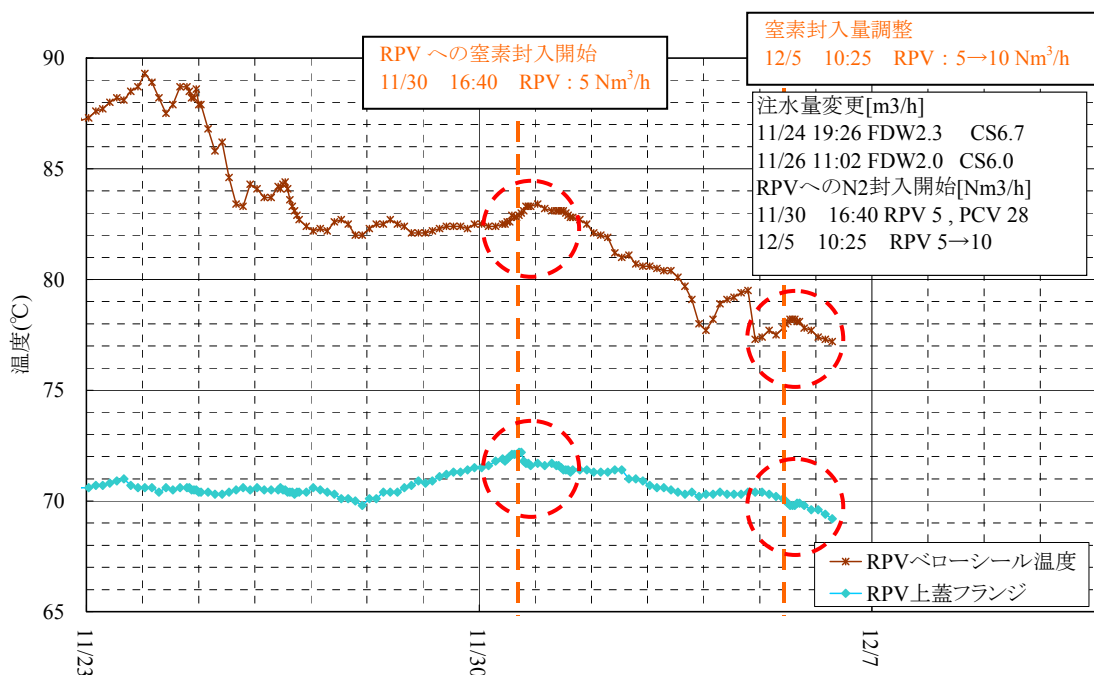


図8 3号機の原子炉圧力容器への窒素封入時の温度変化について

8. まとめ

- 原子炉圧力容器内に比較的高い濃度の水素が存在し、これが原子炉格納容器へ押し出されたこと等により水素濃度が上昇したと推定しているが、原子炉圧力容器に窒素を封入したことにより、蒸気がない状態においても、水素が可燃限界以下となっている。
- G値とエネルギー吸収率から算出する水素の発生量は、原子炉格納容器ガス管理設備にて測定された水素濃度から算出する水素発生量実測値と比較し、保守的であると評価した。

以上