

高浜発電所 4号機
原子炉自動停止について
(3月7日公開会合でのご指摘事項への対応方針)

2023年3月9日



	説明項目	ページ番号
1	N I S 挙動の解析関連の追記	3
2	電流低下した 1 本制御棒の明記	5
3	電流値が上下するメカニズム	6
4	部分挿入で得られた知見、再発防止の追記	7
5	重故障警報発信時の対応	8
6	C R D M ケーブルの原子炉格納容器貫通部の点検履歴等	1 0

● ご指摘事項

- 制御棒挿入解析条件の詳細エビデンスを報告書へ追加すること。
- M 1 0 位置近傍の制御棒が落下した際の解析結果を提示すること。

● 対応方針

- 制御棒挿入解析条件は下表のとおりであり、事故故障等報告書本文「7. 原因調査」（20ページ）を変更するとともに、添付資料－33に追記する。（本文変更案は次ページの赤字下線部、添付資料案は別紙のとおり）
- M 1 0 位置近傍の制御棒が落下した際の解析結果については、事故故障等報告書本文「7. 原因調査」（20ページ）を変更するとともに、添付資料－33に解析した結果を追記する。（本文変更案は次ページの赤字下線部、添付資料案は別紙のとおり）

解析条件	静特性解析	動特性解析（時刻歴解析）
炉心条件	高浜発電所4号機第25サイクルの燃料装荷パターンで、原子炉自動停止直前までの燃焼度変化を解析により反映した炉心モデル	同 左
制御棒挿入方法	以下の3ケースについて、制御棒を全引き抜きから20ステップずつ炉心に挿入 ① M 1 0 位置の制御棒1本を単独で炉心内に挿入 ② M 1 0 位置とK 4 位置の制御棒2本を同時に炉心内に挿入 ③ D 6、F 1 2、M 1 0、K 4 位置の制御棒4本を同時に炉心内に挿入	M 1 0 位置の制御棒を炉心に落下させ、2チャンネル目のN I S 変化率が7%減少した場合、全制御棒を落下させる
解析コード	A N C （3次元拡散計算コード）	T W I N K L E （多次元炉心動特性解析コード）

変更前

(7) 事象発生時のN I S 挙動の解析結果

事象発生時は、初めにN 4 4 が顕著に低下し、次いでN 4 1 が低下、N 4 2 とN 4 3 は同程度で低下し、N 4 4 の変化率が約 1 7 %、N 4 1 が約 7 % となった際に原子炉が自動停止 * 1 4 したことを確認している。

N 4 1、N 4 2、N 4 3、N 4 4 の指示値低下に差があることから、制御バンクBグループ2の制御棒4本を対象に、単独または複数の組み合わせで炉心に挿入した場合の解析を行い、N I S の挙動が実機と整合するものを確認した。

その結果、炉心M 1 0 位置の制御棒が挿入された場合、実機と同様にN 4 4、N 4 1、N 4 2、N 4 3 の順でN I S 出力が低下することを確認した。

また、M 1 0 位置の制御棒が落下した想定で時刻歴解析 * 1 5 を行った結果、実機のN I S 出力と変化傾向が一致していることを確認した。

なお、炉心M 1 0 位置と同じ制御バンクBグループ2について、制御棒2本同時挿入および4本同時挿入の場合の解析を行った結果、N I S の挙動が実機とは異なることを確認した。

これらのことから、事象発生時にはM 1 0 位置の制御棒が挿入されたと推定した。

変更後

(7) 事象発生時のN I S 挙動の解析結果

事象発生時は、初めにN 4 4 が顕著に低下し、次いでN 4 1 が低下、N 4 2 とN 4 3 は同程度で低下し、N 4 4 の変化率が約 1 7 %、N 4 1 が約 7 % となった際に原子炉が自動停止 * 1 4 したことを確認している。

N 4 1、N 4 2、N 4 3、N 4 4 の指示値低下に差があることから、制御バンクBグループ2の制御棒4本を対象に、単独または複数の組み合わせで炉心に 2 0 ステップずつ 挿入した場合の解析を行い、N I S の挙動が実機と整合するものを確認した。解析には 3 次元拡散計算コードであるA N Cコードを使用した。

その結果、炉心M 1 0 位置の制御棒が挿入された場合、実機と同様にN 4 4、N 4 1、N 4 2、N 4 3 の順でN I S 出力が低下することを確認した。また、炉心M 1 0 位置と同じ制御バンクBグループ2について、制御棒2本同時挿入および4本同時挿入の場合の解析を行った結果、N I S の挙動が実機とは異なることを確認した。

これを踏まえ、M 1 0 位置の制御棒が落下した想定で時刻歴解析 * 1 5 を行った結果、実機のN I S 出力と変化傾向が一致していることを確認した。解析には、炉心の動特性を3次元的に評価可能であるT W I N K L Eコードを使用した。実機におけるM 1 0 位置の制御棒が落下し始めた時刻は特定できないため、ここでは実機のN I S (N 4 4) データが低下する直前の時刻 [1 5 : 2 1 ; 5 5 4] に落下し始めたと想定した。

これらのことから、事象発生時にはM 1 0 位置の制御棒が挿入されたと推定した。

なお、M 1 0 位置以外の制御棒が落下した場合のN I S 挙動の違いを参照する観点で、M 1 0 位置近傍4箇所の制御棒1本が落下したケース等の時刻歴解析を行っており、いずれの結果よりもM 1 0 位置の制御棒が落下した場合の解析が、実機のN I S 挙動に近いことを確認している。

● ご指摘事項

電流低下した1本の制御棒（D6）を報告書へ明記すること。

● 対応方針

事故故障等報告書本文「6. 時系列」（2ページ）に以下のとおり記載していたが、電流低下が認められた制御棒がD6であることを、以下の赤字下線部のとおり、具体的に記載する。

変更前

01時00分 設備所管課によるCRDMの点検を開始（3回目）
点検の結果、当該パワーキャビネット内の外観に異常は認められなかったものの、当該パワーキャビネットで動作させる制御棒のうち1本について、可動つかみコイル（以下、「MGコイル」*⁵という）の電流値が通常値より低いことが確認され、その後測定した電流波形においても通常とは異なる波形を確認

変更後

01時00分 設備所管課によるCRDMの点検を開始（3回目）
点検の結果、当該パワーキャビネット内の外観に異常は認められなかったものの、当該パワーキャビネットで動作させる制御棒のうち「D6」1本について、可動つかみコイル（以下、「MGコイル」*⁵という）の電流値が通常値より低いことが確認され、その後測定した電流波形においても通常とは異なる波形を確認

● ご指摘事項

電流値が上下するメカニズムについて、振動や熱の影響等、エポキシによって固定されていることも含めて補足説明を報告書へ追記すること。

● 対応方針

事故故障等報告書本文「7. 原因調査」（26ページ）に電流値が上下するメカニズムについて説明分を、以下の赤字下線部のとおり、追記する。

変更前

b. ケーブル導体抵抗値増加のメカニズム

原子炉格納容器貫通部は内部にケーブル接続部が存在し、ケーブルの心線が接続金具にはんだ付けで固定されている。

今回、D6、M10、K4のケーブルを布設している原子炉格納容器貫通部では、施工時のケーブル処理にてケーブル本体の自重（約100N）が下向きに作用することに加え、コイル行きケーブルが積載していたことによる下向き荷重（約900N）が重畳し、D6、M10、K4のケーブルに通常設計として想定していない引張力（最大約1,000N）が作用していたことから、接続金具のはんだ付けが剥離した可能性がある。

はんだ付けが剥離することにより、通常は一定の面積で接触している接続部が点接触状態となり、導通不良により電流が低下すると共に、ケーブルが接続金具から抜ける方向に引張力が作用することで接触状態が変化して導体抵抗が増減し電流低下の異常が解消されたり、再発したりする可能性があると推定した。

変更後

b. ケーブル導体抵抗値増加のメカニズム

原子炉格納容器貫通部は内部にケーブル接続部が存在し、ケーブルの心線が接続金具にはんだ付けで固定されている。

今回、D6、M10、K4のケーブルを布設している原子炉格納容器貫通部では、施工時のケーブル処理にてケーブル本体の自重（約100N）が下向きに作用することに加え、コイル行きケーブルが積載していたことによる下向き荷重（約900N）が重畳し、D6、M10、K4のケーブルに通常設計として想定していない引張力（最大約1,000N）が作用していたことから、~~接続金具のはんだ付けが剥離した可能性がある。~~

この引張力はケーブル心線と接続金具のはんだ付けに掛かるが、ケーブル心線は、はんだ付けの接着力よりも引張荷重に強いため損傷の可能性は小さい。一方、ケーブル心線周りに充てんされたエポキシ樹脂は、設計上、同じ原子炉格納容器貫通部を通るケーブルと一定の距離を確保することを目的としており、ケーブル本体の自重を超える過度な引張荷重に対する耐力を有していない。そのため、今回の引張荷重がケーブル心線を介して接続金具のはんだ付けの部分に伝播・作用し、はんだ付けが剥離した可能性がある。なお、原子炉格納容器貫通部内部の接続金具はその周囲をシリコン樹脂で満たされていることから、はんだ付けの部分が剥離した状態においても、引き抜きに対する強度はある程度維持される。

はんだ付けが剥離することにより、通常は一定の面積で接触している接続部が点接触状態となり、導通不良により電流が低下する。と共さらに、ケーブルが接続金具から抜ける方向に引張力が作用すると、ここで接触状態が変化により導体抵抗が増減し電流低下の異常が解消されたり、再発したりする可能性があると推定した。また、はんだ付け部分の点接触状態においては、原子炉格納容器内雰囲気の温度や圧力変化や電流によるケーブル心線や接触部の温度変化などにより、はんだ付け部分の接触状態がわずかに変化し、導体抵抗が変動することが想定される。

以上のことから、今回のコイル電流や導体抵抗の変動は、はんだ付け部分のわずかな接触状態の変化により生じたものと推定する。

● ご指摘事項

部分挿入で得られた知見、再発防止について、補足追記すること。

● 対応方針

部分挿入事象に関しては、原子炉自動停止事象との関連性を含め、点検調査の内容を添付資料にて取り纏めており、今回得られた特殊操作における教訓は、事故故障等報告書の添付資料－31（286ページ）にて赤字下線部を追記する。

変更前

3. 原子炉自動停止事象との関連性

停止用制御棒2本（G7、J7）の部分挿入事象は、調査の過程において主電源の投入操作に起因した事象であり、MGコイル主電源他の開放操作後に発生した原子炉自動停止事象との関係性はない。

なお、通常の起動停止においては、全制御棒を0ステップの炉底位置にて主電源の投入操作を行っており、制御棒を引き抜いた運転中においては、各コイルの主電源を交互に開放・投入するような操作を行うことはない。

変更後

3. 原子炉自動停止事象との関連性

停止用制御棒2本（G7、J7）の部分挿入事象は、調査の過程において主電源の投入操作に起因した事象であり、MGコイル主電源他の開放操作後に発生した原子炉自動停止事象との関係性はない。

なお、通常の起動停止においては、全制御棒を0ステップの炉底位置にて主電源の投入操作を行っており、制御棒を引き抜いた運転中においては、各コイルの主電源を交互に開放・投入するような操作を行うことはない。

また、通常の起動停止とは異なる故障時の調査等、特殊な状況においても、原則、今回のような電源操作を実施することはないが、万が一、電源操作を実施する必要がある場合には、上記の点検調査により判明した瞬間的な電流低下事象に十分留意する。さらには、今回のようにMGA、MGBを電源投入した場合、投入後にMGCのMGコイルを一旦、強制保持状態とすることで、その後、SGコイル電源投入時の電流変動があってもMGコイルによるラッチが可能となるため、今回と同様な事象が発生することはない。

● ご指摘事項

- 重故障警報発信後の手順については、対策として必要ではないか。
- 一次原因となったケーブルが覆いかぶさって荷重となっていた点について、推定原因に追記すべきでないか。

● 対応方針

- 重故障警報発信時の対応手順に関する対策に関しては、「9. 対策」（29ページ）に赤字下線部を追加する。また、本対策追加を踏まえ、「8. 推定原因」（28ページ）の一部（赤字下線部）を充実する。
- ケーブルが覆いかぶさり荷重となった点については、「8. 推定原因」（28ページ）の一部（青字下線部）を充実する。

変更前

8. 推定原因

原子炉停止に至った「P R 中性子束急減トリップ」警報発信の原因は、シングルホールド状態にあったM 1 0のS G ラッチにおいて、コイルに電流を供給するケーブルのうち、原子炉格納容器貫通部の内部にあるケーブル接続部に引張力が作用することではんだ付けが剥離し、導通不良に伴う電流値の低下により、S G ラッチが開放されたものと推定した。このことにより、M 1 0 制御棒が挿入され、2チャンネルのN I Sが中性子束急減トリップ設定値に至ったため、原子炉が自動停止したものと推定した。

（以下、割愛）

変更後

8. 推定原因

原子炉停止に至った「P R 中性子束急減トリップ」警報発信の原因は、点検のためにM G ラッチのコイル電源を切り、シングルホールド状態にあったM 1 0のS G ラッチにおいて、コイルに電流を供給するケーブルのうち、原子炉格納容器貫通部の内部にあるケーブル接続部に引張力が作用することではんだ付けが剥離し、導通不良に伴う電流値の低下により、S G ラッチが開放されたものと推定した。このことにより、M 1 0 制御棒が挿入され、2チャンネルのN I Sが中性子束急減トリップ設定値に至ったため、原子炉が自動停止したものと推定した。

また、電気ケーブルの接触不良の原因は、原子炉格納容器貫通部出口（格納容器内側）と端子台の間において、貫通部出口側電気ケーブルに、コイル側電気ケーブルが覆いかぶさっていたことにより、原子炉格納容器貫通部内から引き抜かれる方向に力が働いていたためと推定した。

（以下、割愛）

9. 対 策

（一部、割愛）

変更前

また、これまでの定期検査において格納容器貫通部のケーブルに導通不良があることを検知することができなかったことを踏まえ、今後、設備保全に関する対応として、以下を実施する。

- ・格納容器貫通部のケーブルに関する点検・保守方法を検討し「保全指針」に反映する。
- ・設備改造等によるケーブル布設時の注意事項を「高浜発電所請負工事に関する心得集」に追記する。

9. 対 策

（一部、割愛）

変更後

また、これまでの定期検査において格納容器貫通部のケーブルに導通不良があることを検知することができなかったことを踏まえ、今後、設備保全に関する対応として、以下を実施する。

- ・格納容器貫通部のケーブルに関する点検・保守方法を検討し「保全指針」に反映する。
- ・設備改造等によるケーブル布設時の注意事項を「高浜発電所請負工事に関する心得集」に追記する。

なお、原子炉が運転している状態において、点検調査の操作にて制御棒をシングルホールド状態とした際に原子炉が自動停止した事象であったことを踏まえ、今後、「CRDM重故障」の警報が発信した場合に慎重な原因調査を進めるための点検方針を定める。

● **ご指摘事項**

CRDMケーブルの格納容器貫通部について、施工履歴や保守点検内容・履歴（建設当初からコイル側ケーブルが貫通部ケーブルに覆いかぶさった状態であること）を明記するとともに、導通不良が発生した経緯を明確にすること。

● **対応方針**

事故故障等報告書本文「7. 原因調査」（27ページ）にCRDMケーブルの格納容器貫通部に係る点検履歴等について説明分を、以下の赤字下線部のとおり、追記する。

変更前

(14) 原因調査のまとめ

(一部、割愛)

原子炉格納容器内側にある端子箱内部を詳細観察したところ、原子炉格納容器貫通部出口と端子台の間のケーブル上に他のケーブルが覆いかぶさっていることを確認した。

D6MGコイル、M10SGコイルおよびK4SGコイルのケーブルは、原子炉格納容器貫通部の上方に纏まって布設されており、覆いかぶさったケーブルの荷重を受けやすい状況であった。

(一部、割愛)

原子炉格納容器貫通部の構造等からメカニズムを想定したところ、当該ケーブル施工時の処置にて発生した荷重により、ケーブルに通常設計としては想定していない引張力が作用し、原子炉格納容器貫通部内部のケーブル接続部で導通不良が発生し、ケーブルの導体抵抗の増減や電流変化を引き起こしたものと推定した。

(一部、割愛)

その他、定期検査における原子炉格納容器貫通部のケーブル点検は、端子台に緩みがないことの外観点検やパワーキャビネットからCRDMコイルまでを接続した状態で導体抵抗測定を行うことによりケーブルの健全性に問題がないことを確認してきたが、端子台の裏面のケーブル布設状況の確認やケーブルを触手しながらの導体抵抗測定を実施していなかったことから、今回の導通不良を事前に検知することができなかった。

変更後

(14) 原因調査のまとめ

(一部、割愛)

原子炉格納容器内側にある端子箱内部を詳細観察したところ、原子炉格納容器貫通部出口と端子台の間のケーブル上に他のケーブルが覆いかぶさっていることを確認した。

D6MGコイル、M10SGコイルおよびK4SGコイルのケーブルは、原子炉格納容器貫通部の上方に纏まって布設されており、覆いかぶさったケーブルの荷重を受けやすい状況であった。なお、当該の原子炉格納容器貫通部および端子箱内のケーブルについては建設以降改造した実績はなく、布設状態に変更はないことから、建設時から原子炉格納容器貫通部出口と端子台の間のケーブル上に他のケーブルが覆いかぶさっている状態と推定している。

(一部、割愛)

原子炉格納容器貫通部の構造等からメカニズムを想定したところ、当該ケーブル施工時の処置にて発生した荷重により、ケーブルに通常設計としては想定していない引張力が作用し、原子炉格納容器貫通部内部のケーブル接続部で導通不良が発生し、ケーブルの導体抵抗の増減や電流変化を引き起こしたものと推定した。

(一部、割愛)

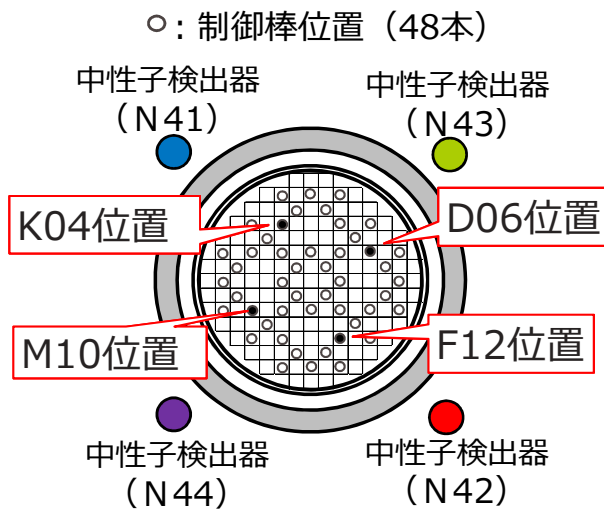
その他、定期検査における原子炉格納容器貫通部のケーブル点検は、端子台に緩みがないことの外観点検やパワーキャビネットからCRDMコイルまでを接続した状態で導体抵抗測定を行うことによりケーブルの健全性に問題がないことを確認してきたが、端子台の裏面のケーブル布設状況の確認やケーブルを触手しながらの導体抵抗測定を実施していなかったことから、今回の導通不良を事前に検知することができなかった。

制御バンクBグループ2の4本を対象に、単独または複数の組合せで 20ステップずつ 炉心に挿入した場合の解析を行い、N I Sの挙動が実機と整合するものを確認した。

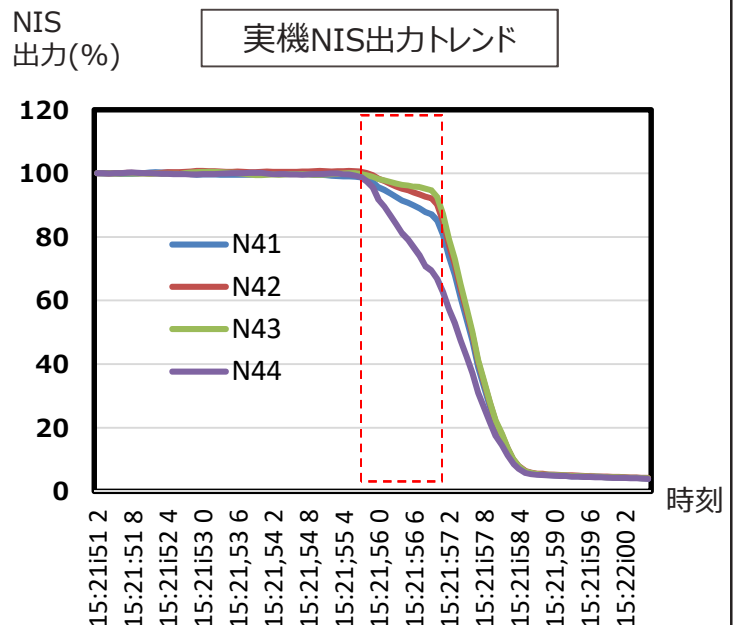
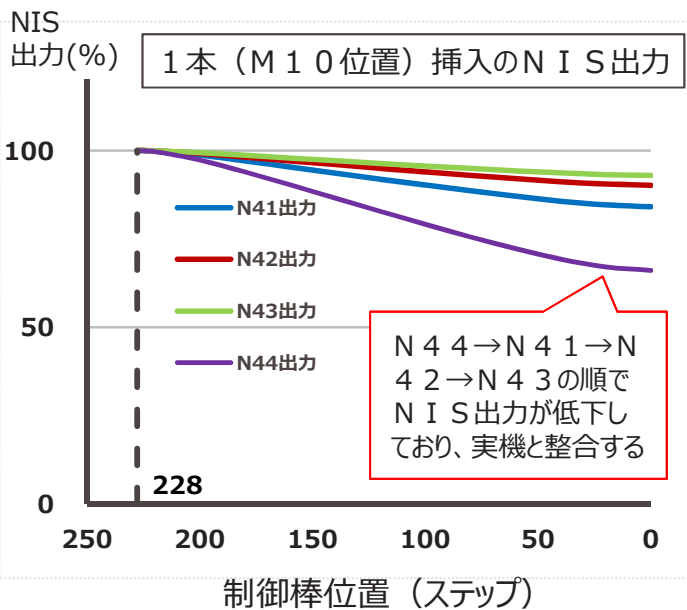
その結果、炉心M 1 0 位置の制御棒が挿入された場合、実機と同様に N 4 4 → N 4 1 → N 4 2 → N 4 3 の順でNIS出力が低下することを確認した。

なお、解析の炉心モデルは、高浜発電所4号機第25サイクルの燃料装荷パターンで、原子炉自動停止直前までの燃焼度変化を解析により反映した出力分布としている。

炉心を上から見たイメージ図

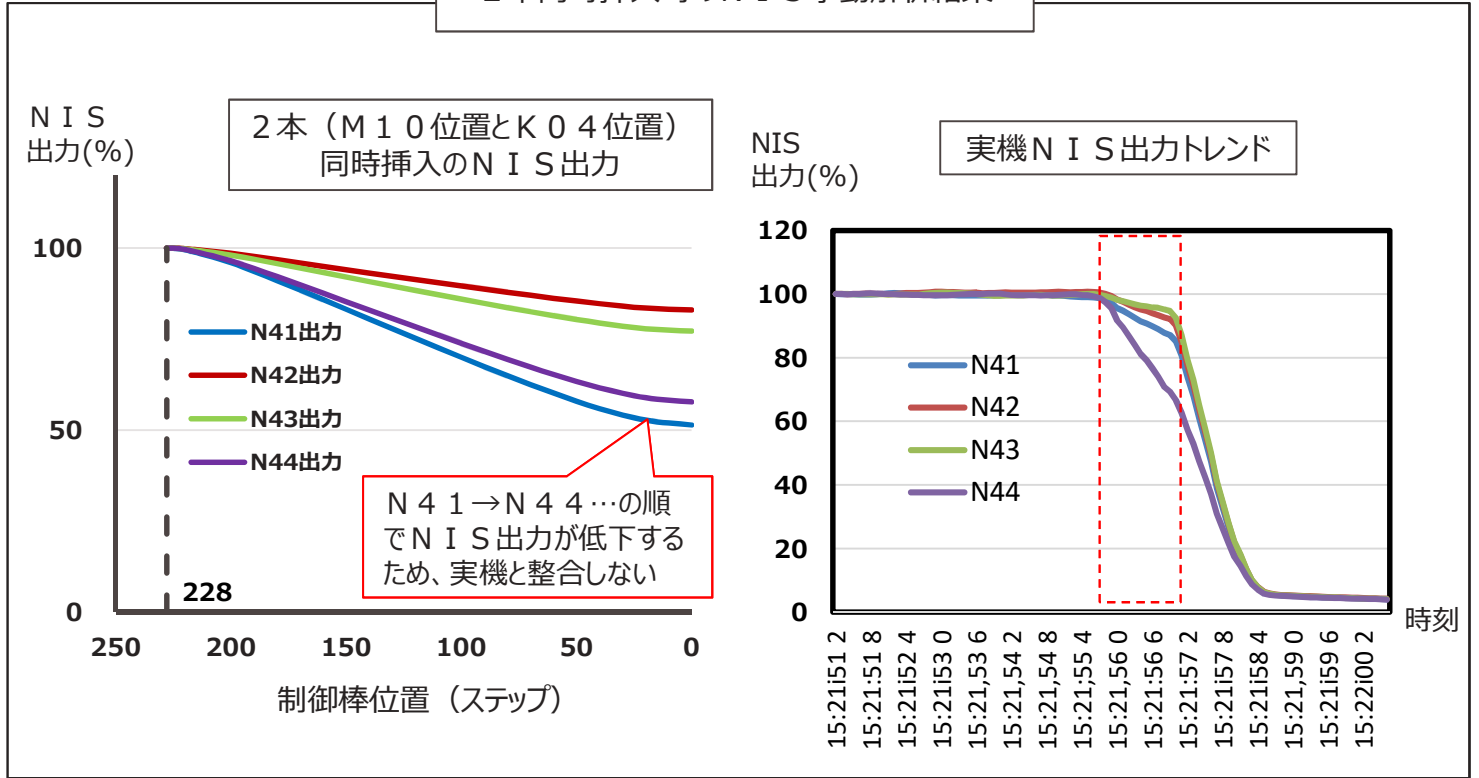


1本挿入時のN I S 挙動解析結果

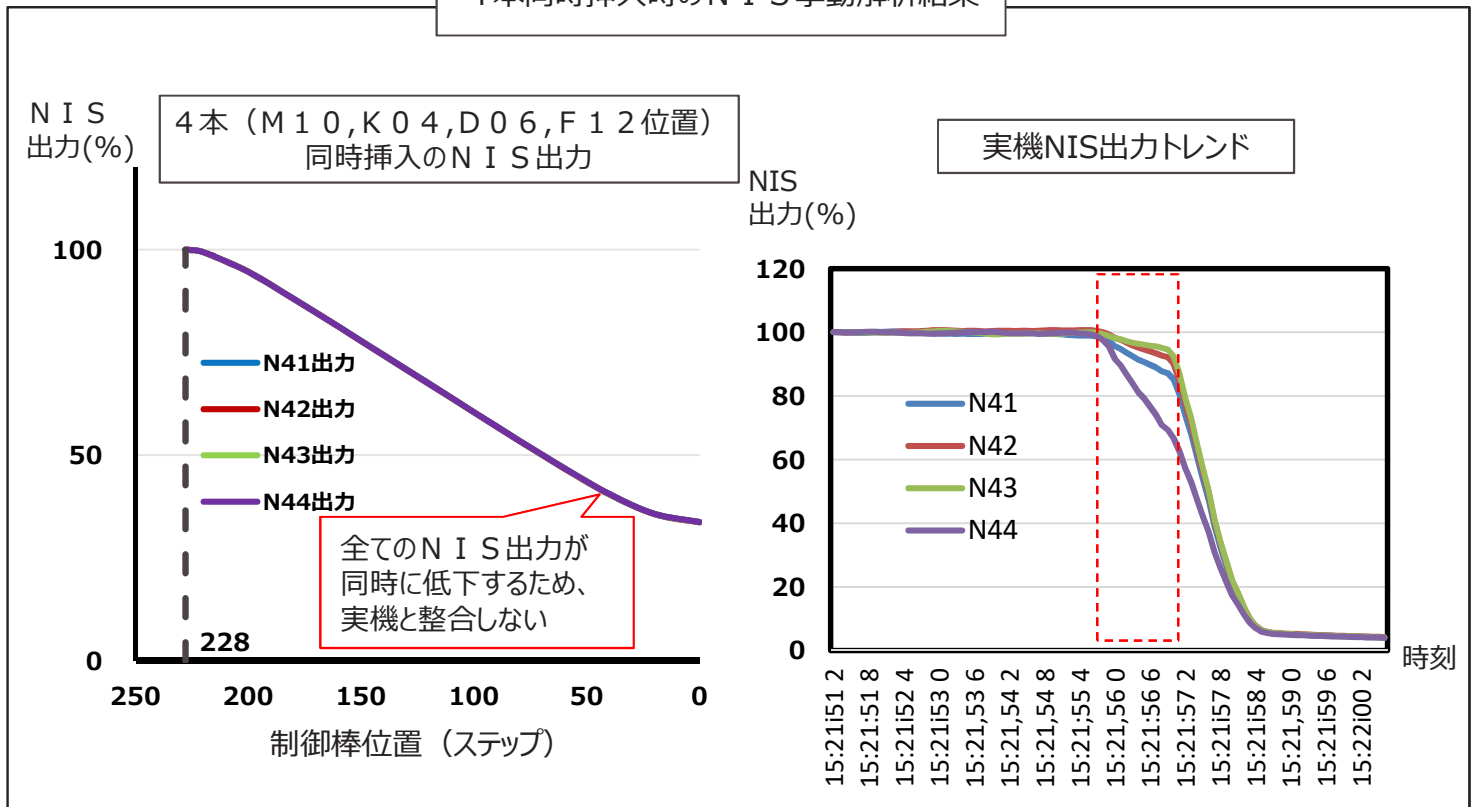


炉心M 1 0 位置と同じ制御バンクB、グループ2について、2 本同時挿入および4 本同時挿入の場合の解析を行った結果、N I S の挙動が実機とは異なることを確認した。

2 本同時挿入時のN I S 挙動解析結果

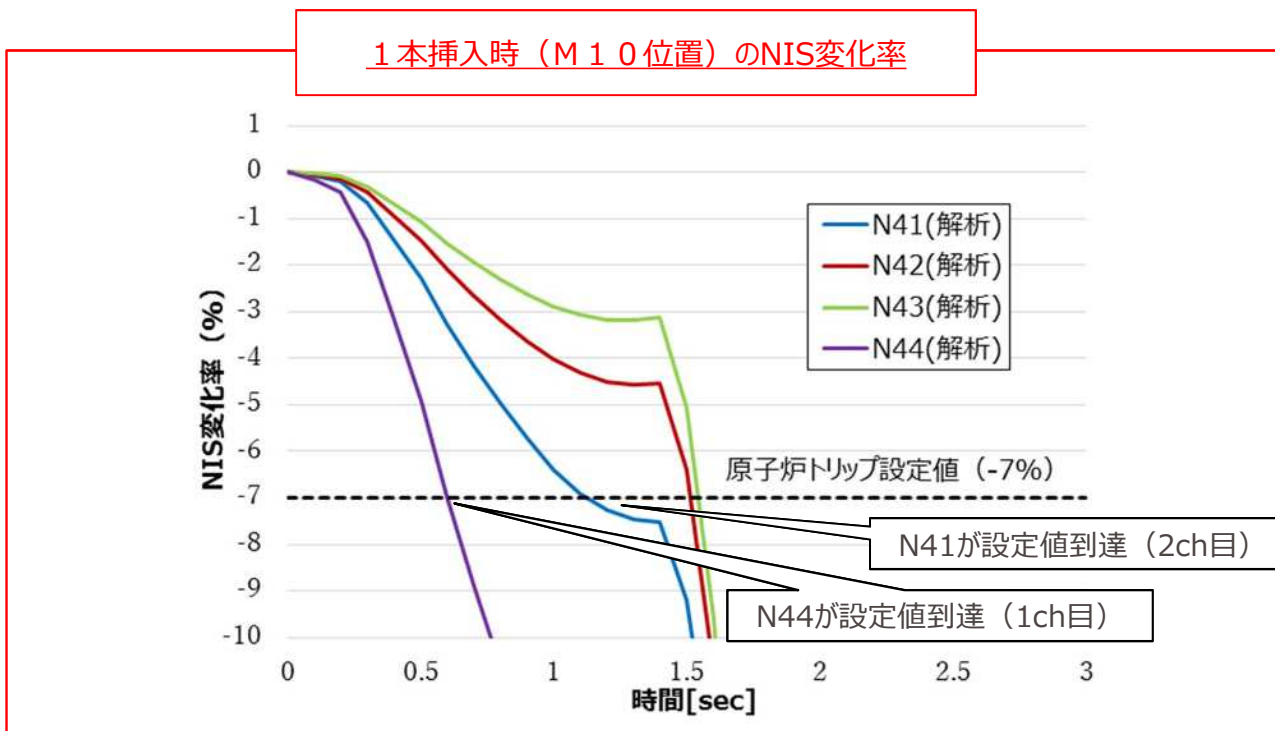
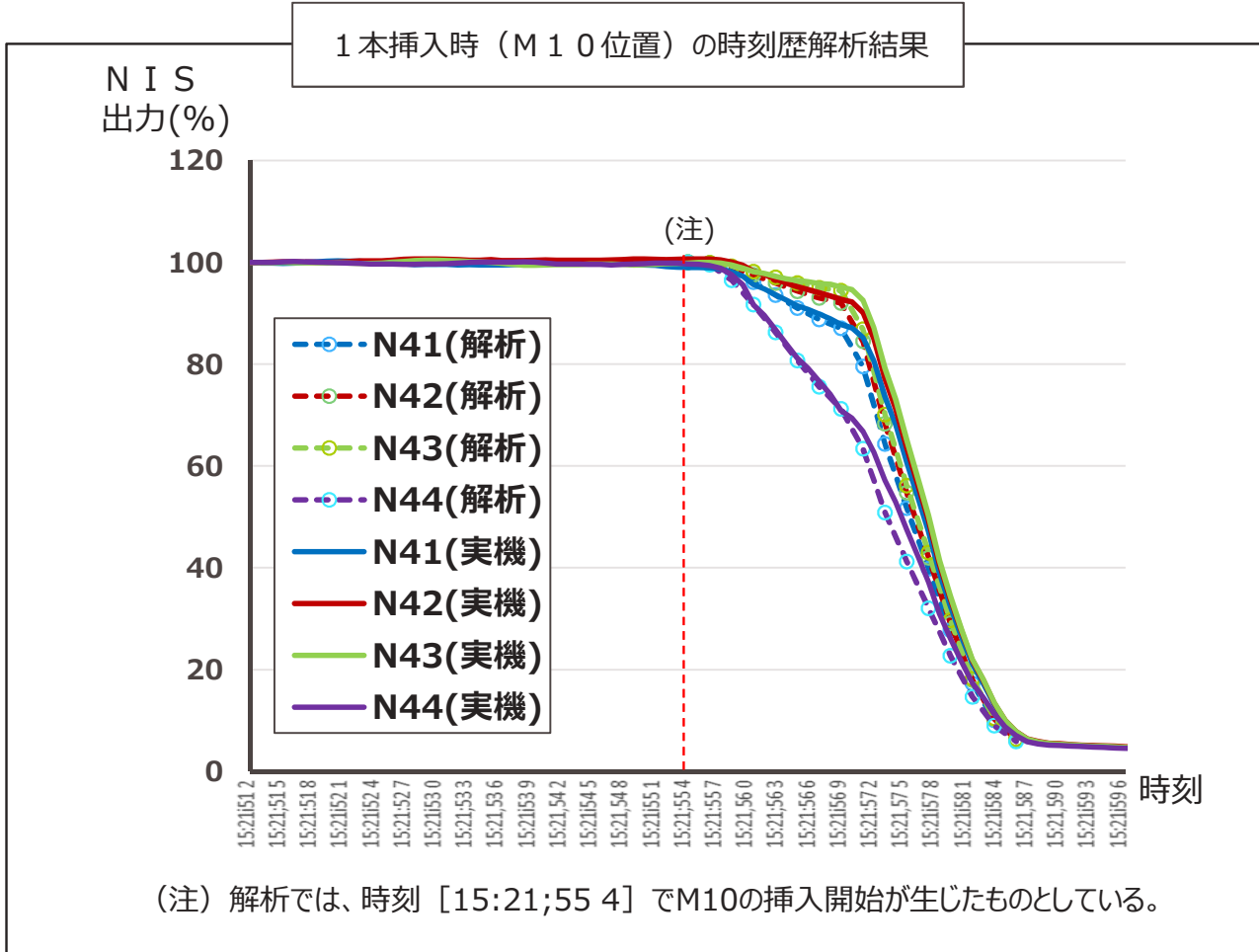


4 本同時挿入時のN I S 挙動解析結果



M 1 0 位置の制御棒が落下した想定で時刻歴解析を行った結果と、実機の N I S 出力とを比較したもの、ならびに N I S 変化率を下図に示す。2チャンネル目の N I S 変化率が原子炉トリップ設定値に到達した後、M 1 0 位置以外の全制御棒が落下する前提で解析を行った。

N I S の変化傾向は一致しており、M 1 0 位置の制御棒が挿入されたと推定した。

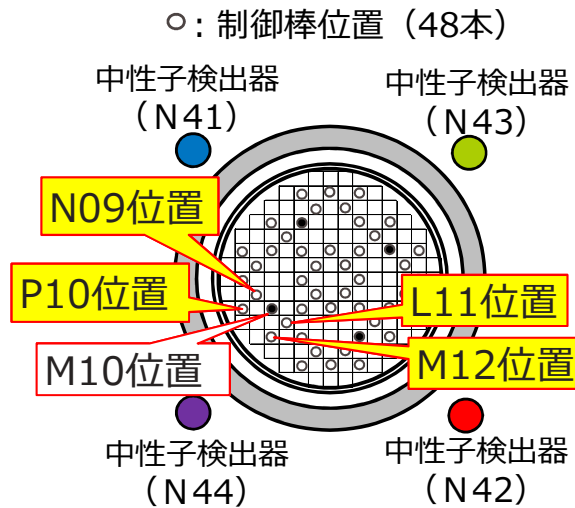


N I S 挙動解析 (4 / 6)

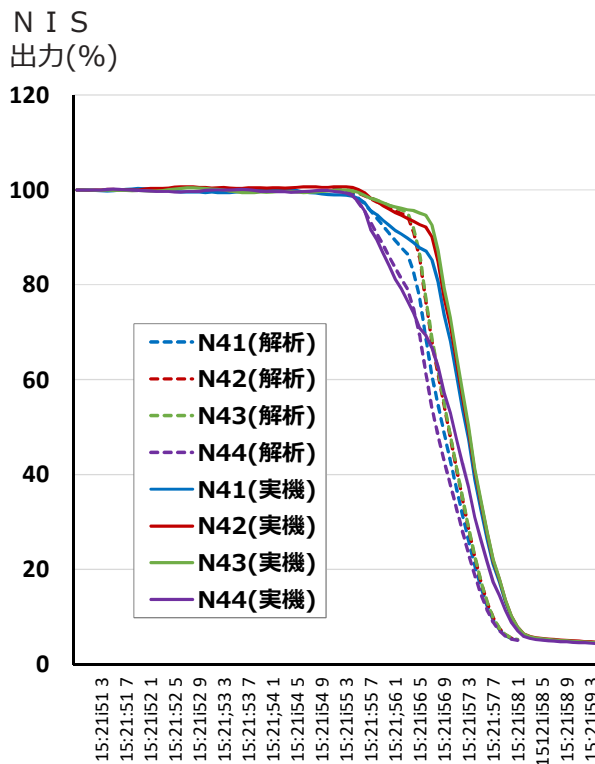
参照解析として、M 1 0 位置近傍の N 0 9、P 1 0、L 1 1、M 1 2 位置の制御棒が 1 本落下した想定で時刻歴解析を行った結果と、実機の N I S 出力とを比較したものを以下に示す。

いずれの場合も、実機の N I S 出力と変化傾向が異なっており、N 0 9 位置落下の場合以外は、原子炉トリップには至らない (2 チャンネル目の N I S 変化率が 7 % 減に達しない) 結果となった。

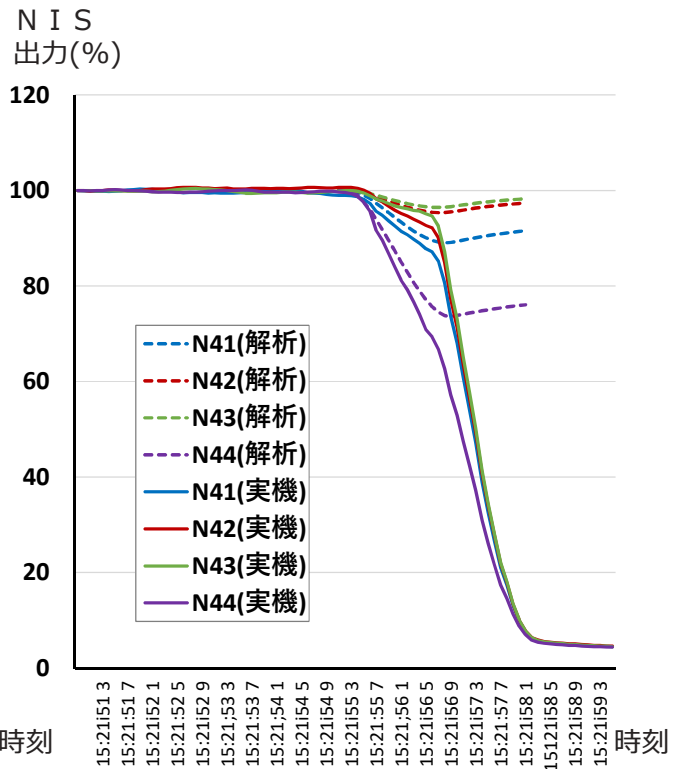
炉心を上から見たイメージ図

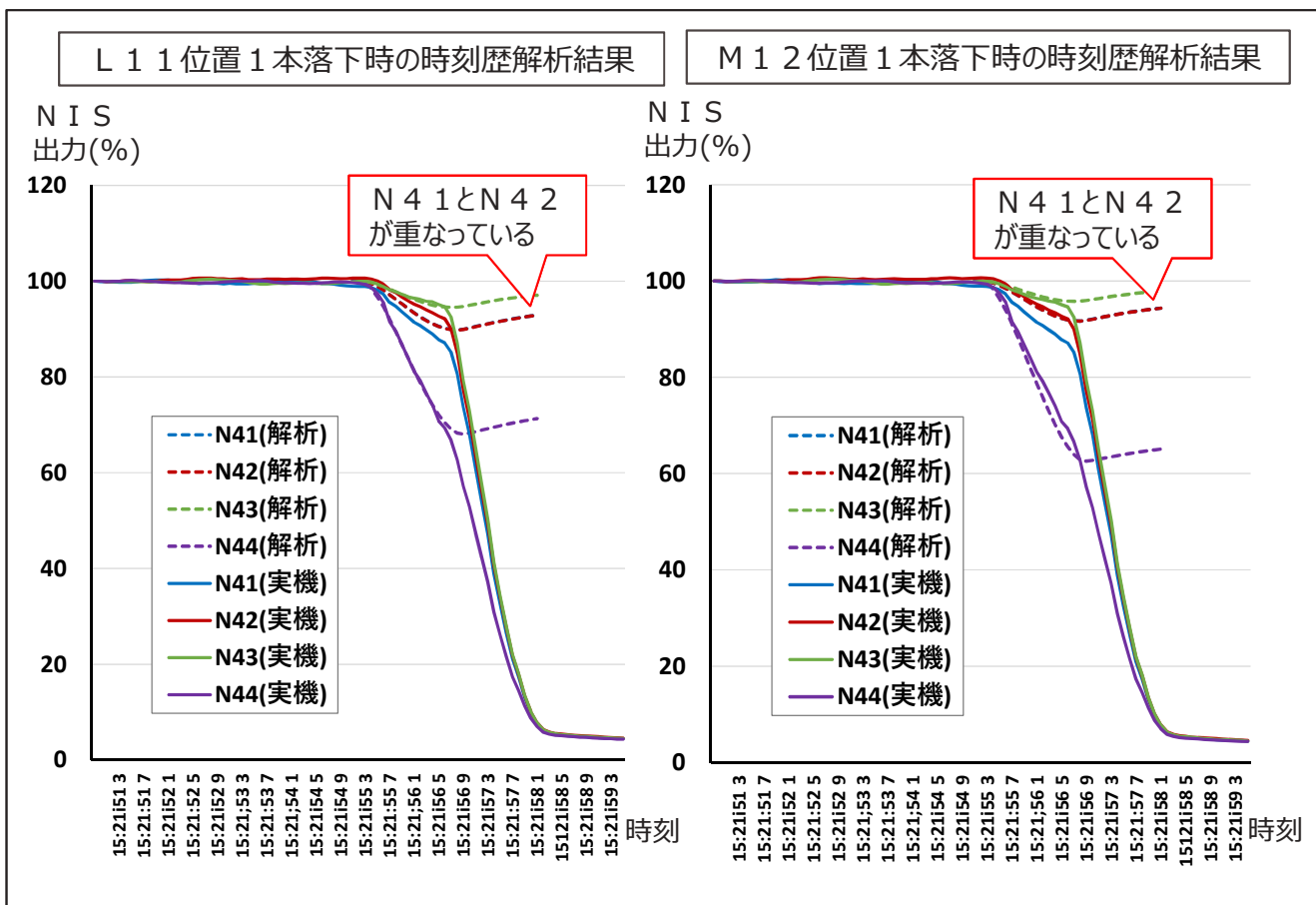


N 0 9 位置 1 本落下時の時刻歴解析結果



P 1 0 位置 1 本落下時の時刻歴解析結果





また、M 1 0 位置に加えて同じ 2 B D のパワーキャビネットで制御する J 0 9 または K 1 0 位置の制御棒が同時に挿入された想定で時刻歴解析を行った結果と、実機の N I S 出力とを比較したものを以下に示す。

いずれの場合も、実機の N I S 出力と変化傾向が異なっている。

