

FAPIG

THE FIRST ATOMIC POWER INDUSTRY GROUP



2014
SEPTEMBER
188



■ 海外事情

世界の高温ガス炉開発状況

(中国 HTR-PM の概要と建設状況) (3)

大橋一孝 / 毛利智聡 / 齋藤正直 / 西尾弘毅 / 大橋準平 / 岡本太志

■ 紹 介

土壌放射能濃度判定機の開発 (9)

中島定雄 / 高橋学士 / 洞 昭仁 / 土田 充

ITER トロイダル磁場コイル構造物製作技術開発活動の紹介 (16)

山田弘一 / 新見健一郎 / 井口将秀 / 中平昌隆 / 小泉徳潔

■ グループ情報

品質保証部会の活動紹介 - なぜなぜ分析参考書の紹介 - (19)

新田和彦 / 高橋正昭 / 梅津博幸 / 長浜哲志 / 斉藤利二 / 江川裕二

FAPIG の機構 (25)

表紙デザイン：中川 敏

夢のある、
夢を描こう。

夢が心の中で育つとき。

かたちにしたいという強い気持ちが、自分をもっと頑張らせてくれる。

私たち富士通もまた、夢を追い続けています。

可能性にあふれた豊かな未来をつくるために。

だれもが暮らしやすい、ネットワーク社会をつくるために。

富士通は、あなたと一緒に夢をかたちにしていきます。

CONTENTS

■ Overseas Information	
Development Status of the HTGR in the World	
– Outline and Construction Status of the Demonstration	
HTGR Program (HTR-PM) of China	(3)
K. Ohashi / T. Mouri / M. Saito / H. Nishio / J. Ohashi / F. Okamoto	
■ Introduction	
Development of the Equipment for Measuring Specific Activities	
of Gamma-emitting Radionuclides in Soil	(9)
S. Nakashima / S. Takahashi / A. Hora / M. Tsuchida	
Introduction about Development for Manufacturing	
of Structure for ITER Troidal Field Coil	(16)
H. Yamada / K. Niimi / M. Iguchi / M. Nakahira / N. Koizumi	
■ FAPIG Activity	
Introduction of the Activity of the Quality Assurance Section	
– Introduction of the Reference Book of the Why-Why Analysis –	(19)
K. Nitta / M. Takahashi / H. Umetsu / T. Nagahama	
T. Saitoh / Y. Egawa	
Cover Design	Satoshi Nakagawa

世界の高温ガス炉開発状況 (中国HTR-PMの概要と建設状況)

Development Status of the HTGR in the World – Outline and Construction Status of the Demonstration HTGR Program (HTR-PM) of China

大橋一孝*	毛利智聡**	齋藤正直***	西尾弘毅****
Kazutaka Ohashi	Tomoaki Mouri	Masanao Saito	Hiroki Nishio
		大橋準平*****	岡本太志*
		Junpei Ohashi	Futoshi Okamoto

〔概要〕

中国では高温ガス炉試験炉HTR-10の順調な建設・運転経験を踏まえて、高温ガス炉実証プラントHTR-PMの計画が進んでおり、福島第一の事故の影響による中断はあったものの、2012年12月からプラント建設がスタートし、2017年の運転開始を目標に現在建設が進められている。本報では、HTR-PM計画の概要や建設状況などを中心に、中国における高温ガス炉の開発状況を紹介します。

1. はじめに

FAPIGでは、高温ガス炉の実用化と事業展開を目指して高温ガス炉プロジェクト部会を設置し、その活動の一環として世界の高温ガス炉の開発状況の調査を継続して実施している。今般、今までの調査結果をまとめ、各国の開発動向をシリーズで紹介することとなった。初回の本報では、現在建設中である中国の高温ガス炉実証炉HTR-PMの状況について紹介する。

中国では、2014年4月時点で17基、設備容量にして14.7GWeの原子力発電所が稼働中で、さらに30基、32.5GWeの発電所が建設中である¹⁾。2011年の福島第一発電所の事故を受けて、一時全プラントの建設が凍結されたが、2012年末に内陸部の発電所を除き建設が再開されている。本稿で紹介するHTR-PMは、この時に建設凍結が解除されたプラントの一つであり、熱出力25万kWの原子炉モジュール2基

を蒸気タービンと組み合わせた電気出力20万kWの発電用実証プラントである。現在2017年の運転開始を目指して鋭意建設が進められている。

以下、中国における高温ガス炉開発の経緯、HTR-PMの概要、HTR-PMの建設状況などを、IAEA国際会議などで公表された公開文献に基づき紹介する。

2. 中国における高温ガス炉開発の経緯

中国における高温ガス炉の開発は、1970年代に開始された。その後、1986年の国家計画（863ハイテク計画）により国として高温ガス炉の開発を進めることが決定され、清華大学の核能技術設計研究院（INET）サイトに熱出力1万kWの高温ガス試験炉のHTR-10を設置する計画が1992年から開始された。HTR-10は、2000年に建設を終了して初臨界となり、2003年から定格出力運転が開始された²⁾。その後は、長期運転の実施により運転経験を蓄積するととも

* 富士電機(株) 発電プラント事業部 原子力技術部

** 川崎重工(株) エネルギープラント総括部 原子力プロジェクト室

*** 清水建設(株) 原子力・火力本部 国際原子力部

**** 双日(株) 原子力・ユーティリティ事業部 原燃第一課

***** 原子燃料工業(株) 企画部

に、異常事故状態を模擬した各種の安全性実証試験が行われ、高温ガス炉の固有安全特性を実証するための多数のデータの取得が行われた。HTR-10の主要仕様や外観図などをまとめて図1¹⁾に、HTR-10で実施された安全性実証試験結果の例を図2²⁾に示す。図2の「(a) 強制冷却喪失模擬試験」は、福島第一発電所の事故のように炉心の強制冷却が喪失し、かつ原子炉スクラムにも失敗した場合を仮想的に模擬しても炉心の温度反応度フィードバック特性などの固有特性により原子炉出力が低下し、一定期間未臨界が維持されることを確認したものである。また、「(b) 反応度事故模擬試験」は、上記に加えて制御棒引抜きによる反応度添加を重ね合わせた場合でも、固有停止特性が確保される

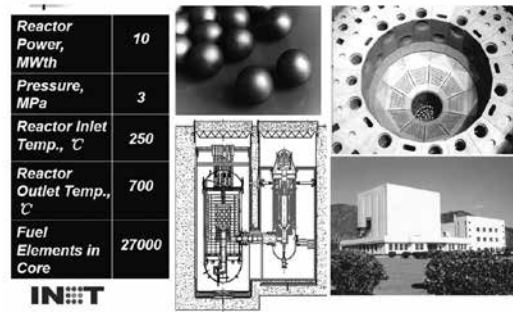
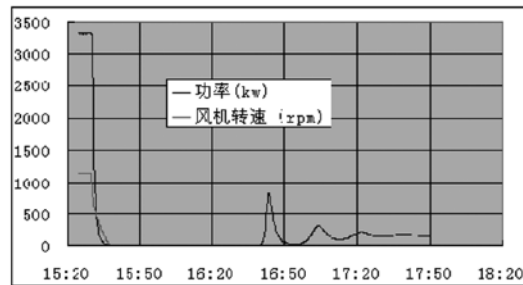
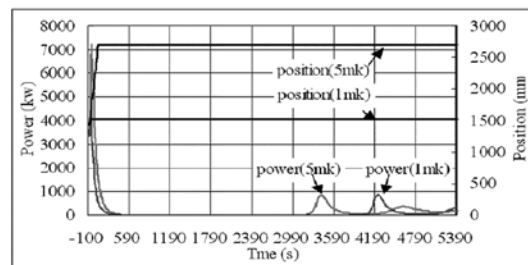


図1 HTR-10試験炉の概要¹⁾



(a) 強制冷却喪失模擬試験



(b) 反応度事故模擬試験

図2 HTR-10における安全性実証試験の例²⁾

ことを確認したものである。ちなみに、高温ガス炉に使われる燃料の型式は、ドイツを中心に開発の進められたペブル型燃料と、米国や日本を中心に開発されたブロック型燃料の二つに大別されるが、中国では前者のペブル燃料を採用しており、HTR-10やHTR-PMの原子炉設計は、かつてドイツで開発されたHTR-モジュールの設計³⁾に基づいたものである。

3. HTR-PMの概要

HTR-10の建設および運転の成功を受けて、2001年からHTR-PM (High Temperature Reactor-Pebble-bed Module) と称する実証炉計画がスタートした。

同計画では、HTR-PM技術の中国市場での位置付けを、

- ① 発電プラントとしての軽水炉の補完
 - ② 石油や天然ガスの代替（重油回収や石炭のガス化/液化利用など）
 - ③ HTR-10技術の高度化
- としており、そのための達成すべき技術的な目標として下記を挙げている⁴⁾。

- ① 固有安全特性の実証
 - ・特別な安全設備に頼らずとも、固有特性により炉心溶融などが起こり得ないことの実証
- ② 経済的競争性の実証
 - ・HTR-PM後継プラントが軽水炉と競争可能であることの実証
- ③ 実証済技術の確証
 - ・実証済技術の組み合わせによるプラントとしての性能実証
- ④ 標準化とモジュラー化
 - ・原子炉2基+タービン1基という構成の標準化およびモジュラー化技術としての確立

HTR-PMの建設サイトを図3⁵⁾に、プラント鳥瞰図（イメージ）を図4⁶⁾に示す。建設サイトは、青島半島先端にある威海市近郊の石島湾であり、同サイトにはウエスチングハウス社のAP-1000をベースに中国が独自改良を行ったCAPI400（電気出力140万kW）の建設も計画されている。HTR-PMのプロジェクト体制は図5⁷⁾に示した通りであり、建設/運転の事業主体がHSNPC（華能山東石島湾



図3 HTR-PMの建設サイト⁵⁾



図4 HTR-PMのプラント鳥瞰図（イメージ）⁶⁾

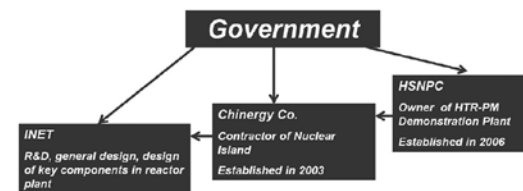


図5 HTR-PMプロジェクト体制⁷⁾

核電有限公司)、プラント建設の主体がChinergy Co.、原子炉系の設計やR&Dの担当がINETという体制になっている。ただし、HSNPCやChinergy Co.は、CHNG（中国華能集团公司）やCNEC（中国核工業建設集团公司）が出資した会社であり、実際のキープレイヤーは、CHNG、CNECおよびINETの三者と言って良い。

HTR-PMでは計画の初期段階において、発電方式と原子炉/炉心設計につきオプションスタディが行われた⁸⁾。具体的には、発電方式については、蒸気サイクルを利用するか、直接もしくは間接のガスタービンサイクルを採用するか検討が行われたが、最終的には実証済み技術の採用を基本方針とし、蒸気タービ

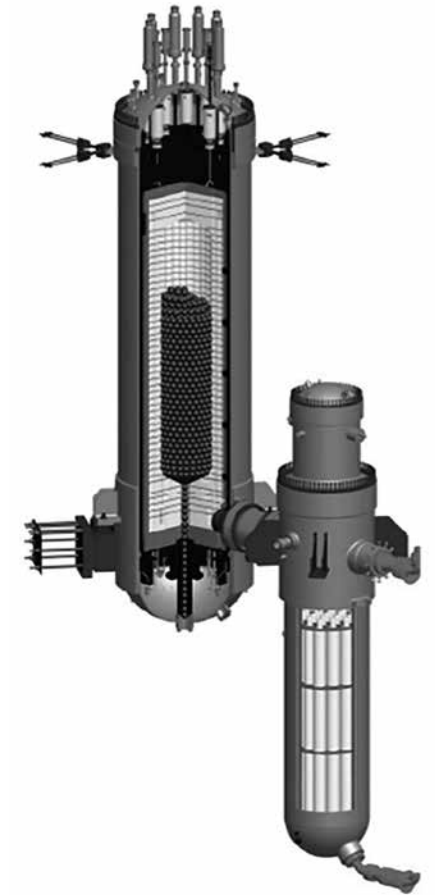


図6 HTR-PM原子炉モジュール¹⁾

ンを採用することが決定された。ペブル燃料の炉心の場合、制御棒の挿入は炉心周囲の反射体に行われるため炉心半径をあまり大きくできないことや、事故時の受動冷却確保のために炉心出力密度が制限されることから、原子炉1基の出力が制限されるという特徴がある。そのため原子炉/炉心設計については、炉心中央に黒鉛ボールのみを装荷する2領域環状炉心の採用などにより炉心出力を増大し、原子炉1基で熱出力458MWを目指すオプションと、従来式の1領域円筒炉心で熱出力250MWとする代わりに、原子炉2基に蒸気タービンを組み合わせるオプションが比較検討された。検討の結果、技術的なリスクをできるだけ避ける観点と両者のコストにあまり大きな違いがないことから、従来式の後者が採用された。

HTR-PMの原子炉モジュール外観図を図6に、プラント主要仕様を表1に、また主冷却系の系統図を図7に示す⁹⁾。

表1 HTR-PM主要仕様¹⁾

Key Plant Specifications

NSSS Modules	2
Reactor thermal power, MW	500
Plant electrical power, MW	200
Diameter of core outer reflector, m	3
Core height, m	11
Primary helium pressure, MPa	7
Core outlet temperature, °C	750
Core inlet temperature, °C	250
Fuel enrichment, %	8.9
Feed water temperature, °C	205
Main steam pressure, MPa	13.24
Main steam temperature, °C	566

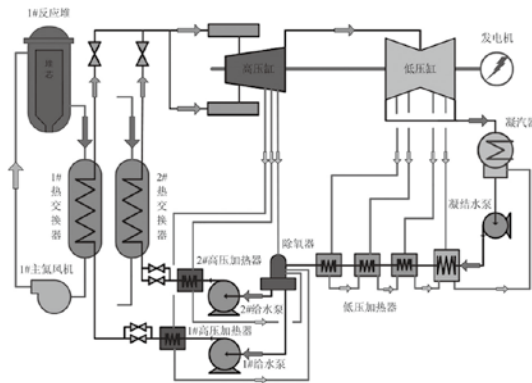


図7 HTR-PM主冷却系系統図¹⁾

表2 HTR-PM安全設計の基本方針³⁾

- 反応度制御（炉停止）
 - ✓ 最大余剰反応度の制限
 - ✓ 十分な温度反応度フィードバック
 - ✓ 受動的炉停止
- 崩壊熱除去
 - ✓ 原子炉外部への受動的な熱除去
 - ✓ 自然循環 RCCS の採用
- 放射能閉じ込め
 - ✓ 被覆燃料粒子第一の障壁とし燃料健全性を保証
 - ✓ 1次圧力バウンダリと低圧ベント型格納施設による深層防護
- 許認可
 - ✓ メカニカスティックソースタムの採用
 - ✓ サイト外緊急時計画は不要

HTR-PMの安全設計の基本方針は表2³⁾に示したとおりであり、原則として動的な手段に頼らず、受動的な炉停止や崩壊熱除去により原子炉の安全性が確保される設計としている。

4. HTR-PM の建設状況

4.1. サイト建設状況

前記のように、HTR-PMは国の安全審査がちょうど終了した段階で、福島第一発電所の事故の影響により建設が凍結された。その後の中国政府の凍結解除の決定を受け、2012年12月にコンクリート打設が開始された（図8）⁶⁾。World Nuclear Newsの2014年4月4日付け記事⁷⁾に掲載されたサイトの様子を図9に示す。

なお、プラントの建設工期は50ヶ月（建屋18ヶ月、据付18ヶ月、コミッショニング14ヶ月）で、2017年末に商用発電開始を目指すとのことである。



図8 HTR-PMコンクリート打設開始時の状況（2012年12月）⁶⁾



図9 HTR-PMサイトの状況（2014年始め頃）⁷⁾

4.2. 主要機器の製作状況など

HTR-PMでは、主要機器を中国国内で製造することを基本方針としている。そのため、機器の確証試験用に熱出力10MWのヘリウム試験ループ（図10）が建設され、蒸気発生器やヘリウム純化設備、あるいはペブル炉心特有の燃料取扱設備やボロン小球停止設備などの試験が行われた⁸⁾。また、原子炉圧力容器についても、図11⁹⁾に示すように中国国内での製造が順調に進められているようである。ただし、原子炉の心臓部に使われる原子炉級黒鉛に限っては中国での生産はできず、日本の

Parameters of the facility

- Thermal power of SG: 10MW
- Temperature: 750 °C
- Pressure: 7 MPa
- Working fluid: Helium

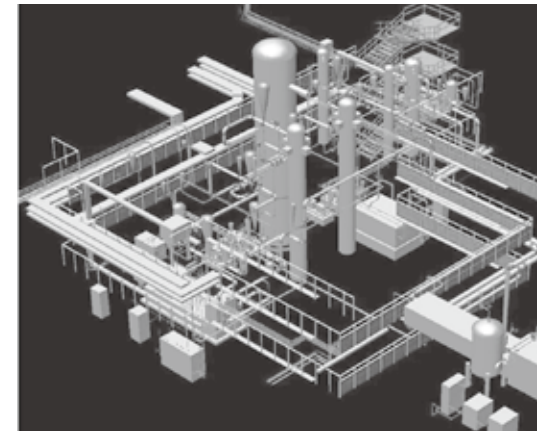


図10 ヘリウム試験ループ⁸⁾

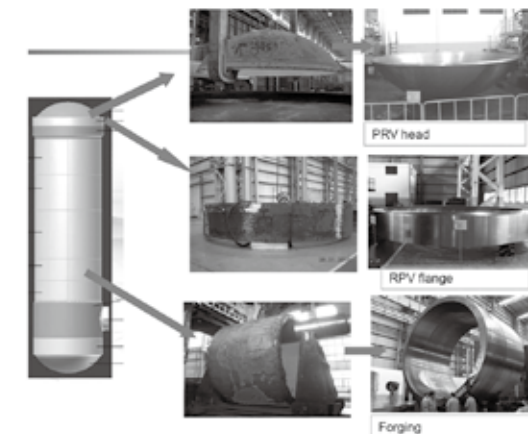


図11 原子炉圧力容器（RPV）の製造状況⁹⁾

東洋炭素株式会社が供給する計画となっている。

また、本体の建設に先立ち、図12¹⁰⁾に示すように、運転シミュレーターも準備されている。

4.3. HTR-PM の経済性について

HTR-PMは、商用プラント展開時に中国国内の軽水炉と競合できる経済性を目指している。それを可能とできる根拠としては、

- ① 簡素なプラントシステム
- ② 従来火力並みの高温・高圧蒸気条件による高い発電効率
- ③ 複数ユニット設置によるサイトインフラコストの低減およびモジュール化/標準化による製作・建設コストの低減
- ④ 運転中燃料交換方式による高稼働率の実現
- ⑤ 高燃焼度（100GWD/tもしくはそれ以上）の達成による燃料サイクルコストの低減が挙げられている⁵⁾。

実証1号炉となるHTR-PMの建設費については、R&D費および敷地整備費を除いて2000USD/kWeを目指すとされている⁵⁾。

4.4. 燃料工場について

プラント本体の工事と並行して、HTR-PMの運転に必要な燃料を製造・供給するための燃料工場の準備も進められている。2013年2月に中国当局



図12 HTR-PM運転シミュレーター¹⁰⁾



図13 HTR-PM向け燃料製造工場の着工式¹¹⁾

の認可を受け、同年3月に内モンゴル州包頭（パオトウ）にて着工式が行われた（図13）⁹⁾。この燃料工場は、これまで精華大学（INET）が開発を進めてきたペブル燃料の製造技術を民間に移転し、年間30万個（約3/4炉心相当）のペブル燃料製造を可能とするものであり、2015年の完成を目指している。

5. おわりに

以上、中国において建設が進められているHTR-PM実証炉計画の状況について紹介した。本計画が、実証済み技術の採用を基本方針として、着実かつ堅実に計画が進められていることがわかり頂けたかと思う。本計画の成功により世界的な高温ガス炉開発の流れに弾みがつくことに期待して、今回の紹介を終わりたい。

参考文献

- 1) Fu LI, HTR Progress in China, Technical Meeting on the Safety of High Temperature Gas Cooled Reactors in the Light of the Fukushima Daiichi Accident, Vienna, Austria, April 8-11 2014.
- 2) 早川他, 中国における実用高温ガス炉の開発, FAPIG No. 158 (2001-7).
- 3) Sun Yuliang, Technology Development, Design and

Safety Features of HTR-PM and its Deployment Scheme, IAEA Workshop on Technology Assessment of SMRs, Vienna, Austria, Dec. 5-9 2011.

- 4) G. H. Lohnert, Technical design features and essential safety related properties of the HTR-Module, Nuclear Engineering and Design 121 (1990) 259-275.
- 5) Z. Zhang et al., Current status and technical description of Chinese 2 x 250 MWth HTR-PM, Nuclear Engineering and Design 239 (2009) 1212-1219.
- 6) Yuliang Sun, HTR Development Status in China, IAEA TWG-GCR Meeting, Vienna, Austria, March 5-7 2013.
- 7) First HTR-PM construction progresses, World Nuclear News, 4 April 2014.
- 8) Yujie DONG, Status of Development and Deployment Scheme of HTR-PM in the People's Republic of China, Interregional Workshop on Advanced Nuclear Reactor Technology for Near Term Deployment, Vienna, Austria, July 4-8 2011.
- 9) Chinese HTGR fuel plant under construction, World Nuclear News, 21 March 2013

土壌放射能濃度判定機の開発

Development of the Equipment for Measuring Specific Activities of Gamma-emitting Radionuclides in Soil

中島定雄* 高橋学士* 洞昭仁** 土田充***
Sadao Nakashima Satoshi Takahashi Akihito Hora Mitsuru Tsuchida

〔概要〕

東京電力福島第一原子力発電所の事故の復旧過程で除染活動に伴い生じた土壌、草木、落葉・枝、側溝の泥やこれら以外の廃棄物が福島県内に大量に仮置きされている。この土壌や廃棄物などを、最終処分するまでの間、安全で集中的に管理・保管するための中間貯蔵施設が福島県内に建設される計画である。中間貯蔵施設ではこれらを受け入れる際に放射能濃度によりⅠ型（8000Bq/kg以下）とⅡ型（8000Bq/kg超過）に分別して処理する計画である。

富士電機と清水建設は、大量の土壌の放射能濃度を連続バッチ方式かつ自動で測定し、Ⅰ型とⅡ型に分別する装置を開発した。装置は、放射能統計誤差、土壌の形状・寸法・性状の変化や環境条件の変化も考慮して総合誤差±20%の高精度の測定が可能である。

1. まえがき

2011年3月の東日本大震災に伴い東京電力福島第一原子力発電所の事故が発生した。事故により放出された放射性物質により、周辺環境に汚染をもたらした。事故の復旧活動¹⁾として除染作業が行われ、取り除かれた土壌、草木、落葉、枝、側溝の泥やこれら以外の廃棄物が大量に発生し、福島県内にフレキシブルコンテナなどに収納された状態で仮置きされている。

環境省は、この土壌や廃棄物などを最終処分するまでの間、安全で集中的に管理・保管するための中間貯蔵施設²⁾を福島県内に建設することを計画している。同施設では、これらを受け入れる際に放射能濃度によりⅠ型（8000Bq/kg以下）とⅡ型（8000Bq/kg超過）に分別して処理する計画である³⁾。

富士電機と清水建設は、大量の土壌の放射能濃度を連続バッチ方式かつ自動で測定し、Ⅰ型とⅡ型に分別する装置を開発した。土壌の放射能測定は、フレキシブルコンテナに収納した状態で測定する方式や土壌を取り出して直接測定する方式が考えられる。本開発では正確な測定・分別を行う

観点から土壌を直接測定する方式を選択した。フレキシブルコンテナを破袋して取り出した土壌は、内部に草・枝などの混在物を含んでおり、これが測定の不確かさの大きな一因となる。本開発では測定対象とする土壌は、篩にかけて混在物を取り除いた土壌とした。大量の土壌を測定・分別するため、本開発ではコンベア方式で土壌を測定部に送り込み測定を行う方式を採用した。

土壌の放射能測定・分別では、基準値8000Bq/kgに対して、測定装置の総合誤差を考慮した低い濃度にスクリーニングレベルを定め、測定・分別を行う。したがって、スクリーニングレベルから基準値までの濃度範囲にある測定対象土壌は、基準値を超えていないにもかかわらずⅡ型として判定されることになり、分別の効率を悪化させることになる。これを改善するためには測定装置の総合誤差を小さくする必要があるが、通常の測定装置では大きな誤差要因となる測定対象物の形状や密度の変化に対応した測定が行われていないため、総合誤差としては±50%を超えるような装置も多数存在する。

このため、本開発では、測定対象物の形状・寸法・

* 富士電機㈱ 産業インフラ事業本部 産業計測機器事業部 放射線システム部

** 富士電機㈱ 産業インフラ事業本部 東京工場 機器生産センター 装置設計部

*** 清水建設㈱ エンジニアリング事業本部 土壌環境事業部 土壌環境第一部

嵩密度の違いや測定系の統計変動・環境変化による影響を考慮しても、基準値8000Bq/kgを±20%の総合誤差で測定が可能で、スクリーニングレベル8000Bq/kg×(100-20)%=6400Bq/kgで判定できる装置を開発目標とした。

2. 実証機の外観と仕様

本開発では、1項の開発目標に基づいた実証機を設計・製作し、福島県内の実土壌を用いた実証試験を行い、性能を検証した。表1に実証機の仕様表を示す。

表1 土壤放射能濃度判定機の実証機の仕様表

No.	項目	仕様	備考
1	測定線種	γ線	
2	適用検出器	NaI(Tl)シンチレーション検出器(φ2×2インチ)6本	
3	測定対象核種	Cs-134, Cs-137	
4	総合不確かさ	±20%以内 条件：(1000(上底)+1360(下底))/2×150×400mm ³ 台形土壌 比重1.3,スクリーニングレベル6400Bq/kg,コンベア速度300mm/s	
5	測定下限値	2000Bq/kg以下(周囲BG5.0μSv/h以下)	
6	SCA設定	527~740keV(Cs-134, Cs-137)	
7	温度補償		
	方式	バイアス補償	
	補償精度(ゲイン)	±10%(0~40℃, 20℃基準) (検出器とプリアンプ組合せにて)	ヒータとファンを設置
8	温度特性	±10%以内(-10~45℃, 20℃基準)	
9	耐湿性	±2%以内(40~90%, 35℃/65%基準)	
10	保護等級	IP54防塵形, 防沫形相当とする	
11	環境仕様		
	使用温度範囲	-10~45℃	
	使用湿度範囲	相対湿度90%以下	
12	測定対象物		
	土壌形状	400mm(W)×1360~1880mm(L)×150mm(H)	
	土壌搬送間隔	2秒以上	
13	土壌の重量・形状等の計測機能	コンベアBC1に取り付けたロードセルにて土壌重量の計測 コンベアBC2に設置する形状測定器にて土壌高さ分布と土壌形状・寸法の計測	
14	分別機能	放射能濃度の高/低並びに測定不良を判定して、切替ダンパーにて土壌の排出先を切り替え	
15	受入れホッパー	土壌を受け入れるホッパーであり、容量はフレキシブルコンテナ1個分の1.8m ³	
16	切出しフィーダ	小型ベルトコンベアであり、ホッパーから所定量の土壌を切り出す。	
17	コンベアBC1	ロードセルを付属した小型ベルトコンベアであり、切出しフィーダから受け入れた土壌の重量計測とメインコンベアBC2への土壌の搬送を行う。	
18	メインコンベアBC2	方式：ベルトコンベア 定格運搬量：0.018m ³ /s バッチ運転平均搬送能力：33ton/h 定格速度：0.3m/s ベルト幅：500mm	
19	ローラー型土壌成型器	メインコンベアBC2の前方に設置し、コンベアBC1より投入された土壌を所定の高さに成型するもので、3段のローラー型ゲートで構成する。	
20	切替ダンパー	2方向切替シュート方式にて土壌を放射能低と放射能高/測定不良に仕分けする。	

実証機のイメージを図1に示す。実証機は、受入れホッパー、切出しフィーダ、コンベアBC1、ロードセル、メインコンベアBC2、ローラー型土壌成型器、形状測定機、放射能検出部、切替ダンパー、土壌収納容器(高/低/再測定の3台)、制御盤

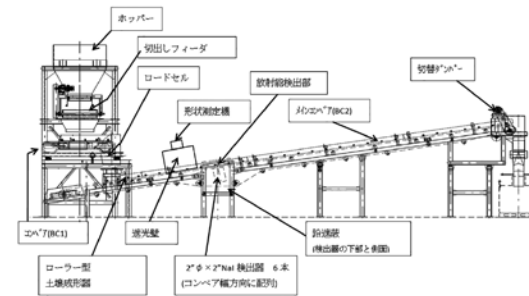


図1 土壤放射能濃度判定機のイメージ図



図2 土壤放射能濃度判定機の外観

御盤で構成する。放射線検出部には、検出器、プリアンプ、CPUボード、設定表示器、警報器を含む。図2に実証機の外観を示す。また、実証機の電気・計装の系統を図3に示す。

実証機の測定のための一連の動作フローを図4に示す。土壌を受入れホッパーに投入すると、切出し

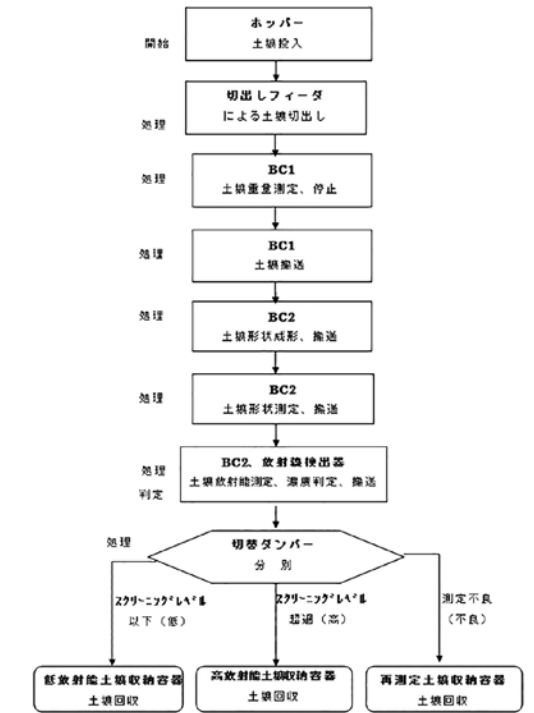


図4 土壤放射能濃度判定機のフロー図

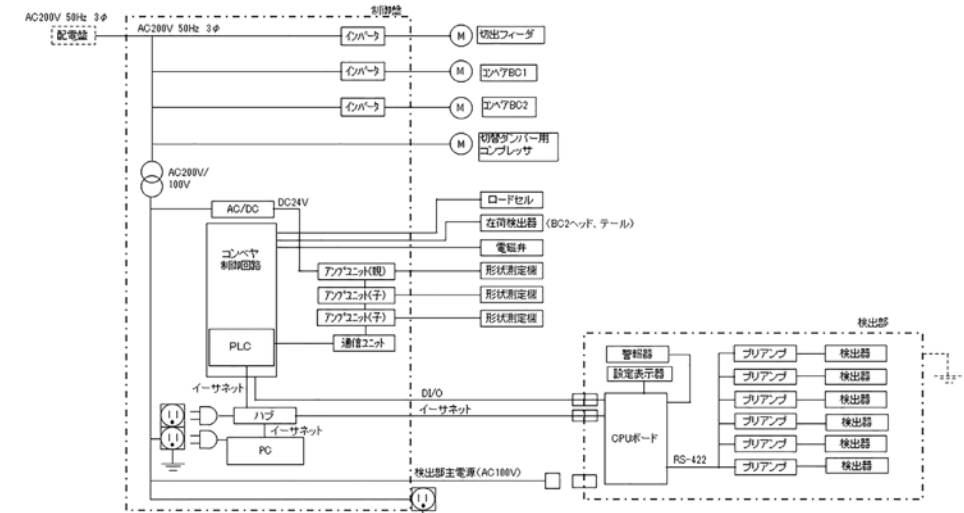


図3 土壤放射能濃度判定機の電気・計装系統図

フィーダが駆動して所定量の土壌を切り出し、コンベアBC1に搬送する。コンベアBC1は土壌を中央位置に移動させた後に付属のロードセルにて土壌重量を測定し、放射能検出部に伝送する。コンベアBC1がさらに駆動して土壌をコンベアBC2に搬送する。コンベアBC2の上流にはローラー型土壌成型器が取り付けられており、コンベアBC1より受け入れた土壌をローラー成型して所定の高さに成型しながら土壌をコンベアBC2で搬送する。コンベアBC2のローラー型土壌成型器の直後に設置された形状測定機にて土壌形状を測定した後に放射能検出部に土壌を搬送する。放射能検出部は、通過する土壌から放出される放射線を計数し、当該土壌の総計数率 N_s (s^{-1})を算定する。この総計数率からあらかじめ測定しておいたバックグラウンド計数率 N_b (s^{-1})を差し引いて正味計数率を求め、これに放射能換算係数 K (Bq/s^{-1})を乗じ、さらにロードセルで測定した重量 W (kg)で除して放射能濃度を算定する。

$$C = K \frac{N_s - N_b}{W} \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

ここで、 C : 土壌の放射能濃度 (Bq/kg)

K : 放射能換算係数 (Bq/s^{-1})

N_s : 測定した総計数率 (s^{-1})

N_b : バックグラウンド計数率 (s^{-1})

W : 重量 (kg)

この放射能濃度をあらかじめ設定したスクリーニングレベルにて、測定した土壌が高放射能土壌か低放射能土壌かを判定する。コンベアBC2により放射能検出部を通過した土壌は、切替ダンパーにて上記の判定結果に基づき、高放射能収納容器または低放射能収納容器に切り替えて投下される。なお、放射能測定において、土壌の重量および形状・寸法が設計中心条件より大きく逸脱する場合には、測定不良と判定し、再測定のラインに排出することになるが、実証機は、設置スペースの関係上、高放射能収納容器に切り替えて投下するものとした。

3. 開発のポイント

本開発では、総合誤差 $\pm 20\%$ を達成するため放

射能測定の高性能化を目指して、以下を開発のポイントとした。

① 土壌の放射能測定誤差の要因としては、以下が考えられる。総合誤差 $\pm 20\%$ を達成するための各要因に対する目標誤差を以下の()内に記載する。

- 1) 土壌の形状・寸法変化 (長さ $\pm 5\%$ 、高さ $\pm 5\%$ 、幅 $\pm 1\%$ 、前後の傾斜角度 $\pm 3\%$)
- 2) 土壌の重量変化 ($\pm 1\%$)
- 3) 土壌の高密度変化 ($\pm 5\%$)
- 4) 検出系の統計変動 (スクリーニングレベルで $\pm 8\%$)
- 5) バックグラウンド変動および自己しゃへい効果 ($\pm 5\%$)
- 6) 検出系の温度・湿度変動 (温度 $\pm 8\%$ 、湿度 $\pm 1\%$)
- 7) 検出系の振動・衝撃による影響 ($\pm 1\%$) (総合誤差には、上記の他に校正時誤差 $\pm 12\%$ とEMC影響 $\pm 1\%$ を含む)

② ①項の誤差要因に対して誤差を軽減するため以下の対応を図った。

1) 土壌の形状・寸法変化の対策

土壌は、切出しフィーダで一定量を切り出し、ローラー型土壌成型器で所定の高さに成型し、幅方向はコンベアBC2の両側面に設けた側板で保持することで、常に、一定形状の土壌を放射能検出部に搬送する設計とした。実証機では、成型土壌の形状は、幅400mm、高さ150mm、上底1000~1520mm、下底1360~1880mmの台形状とした。図5に実証機における成型土壌の形状を示す。

上記のとおり成型した土壌でも上底面には凹凸があり、搬送方向は土壌を拘束していないため長さは測定の都度変化する。また、図5に示す前後の傾斜面の角度 δ_f および δ_b も変化する。($\delta = 40^\circ$ を基準として δ を $20 \sim 90^\circ$ 変化させると計数効率が

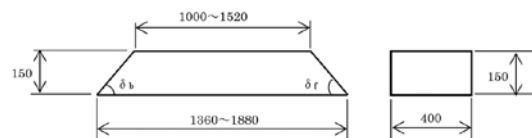


図5 標準土壌形状・寸法

約6%変化し、誤差となる。)

これらによる放射能測定誤差を小さくするため、これらの寸法・角度を測定して式(1)中の放射能換算係数 K を補正するものとした。具体的には、まず、設計中心条件における標準土壌形状における放射能換算係数 K_0 を計算コードMCNPを用いてシミュレーション計算を行い求めた。つぎに、長さ、高さ、角度 δ_f 、角度 δ_b のパラメータをそれぞれ変化させた場合の放射能換算係数の変化量を計算し、各々のパラメータに対する補正計算式を策定した。測定の都度、各パラメータの測定結果からこの補正計算式により補正値を求め、放射能換算係数を次の式で算定することとした。

$$K = K_c K_0 B L H E F \dots\dots\dots \text{式(2)}$$

ここで、 K_c : 校正定数 (無次元)

K_0 : 放射能換算係数 (Bq/s^{-1})

(シミュレーション計算値)

B : 幅の補正值 (無次元)

L : 長さの補正值 (無次元)

H : 高さの補正值 (無次元)

E : 高密度の補正值 (無次元)

F : 角度 δ_f および角度 δ_b の補正值の
平均値 (無次元)

上式中の校正定数 K_c は、実証機で放射能濃度が既知の土壌を測定した時の既知の放射能濃度と実証機の指示値との比である。

2) 土壌の重量変化の対応

切出しフィーダから所定量の土壌を切り出す設計としているが、土壌の性状により重量にばらつきがあるため、コンベアBC1にロードセルを4個取り付け、正確に重量を測定することとした。ロードセルによる重量の測定精度は $\pm 1\%$ 以内である。

3) 土壌の高密度変化の対応

土壌の高密度が変化すると土壌内部から放出される放射線の自己しゃへい効果が違うため測定する計数に大きく影響する。(例えば $0.9g/cm^3$ が $1.6g/cm^3$ に変化すると約30%の誤差となる。)このため、測定した土壌の形状寸法から土壌の体積を計算し、それを重量で除して高密度を算出し、1)項の各パラメータと同様な補正計算式を用いて補正値を求め、式(2)のとおり放射能換算係数を補正する。

4) 検出系の統計変動の対応

放射能測定誤差を減じるため、実証機では土壌に対して搬送方向と直角方向に6台の $2''\phi \times 2''NaI(Tl)$ シンチレーション検出器を並べ大きな総計数率が得られるように配慮した。また、検出器は3cm厚さの鉛シールドで検出面方向以外をしゃへいし、バックグラウンドの影響が小さくなるように配慮した。

5) バックグラウンド変動および自己しゃへい効果の配慮

バックグラウンド線量率の変動は測定結果に大きな影響を与えるため、測定時以外はバックグラウンド計数率を測定し、最新のバックグラウンド計数率にて放射能濃度を演算する方式とした。

通常の放射能測定装置では、バックグラウンド計数率は、装置に測定対象物が装荷されていない状態で測定されているが、実際には測定対象物自体のしゃへい効果により上記よりも低いバックグラウンド計数率となるはずである。本開発では、汚染のない土壌を放射能検出部に装荷してバックグラウンド計数率を測定し、土壌を装荷しない状態でのバックグラウンド計数率との比を補正値 Z として求めた。これを用いて以下の式にてバックグラウンド計数率を補正した。

$$N_b = Z E_b \frac{\sum N_{bi}}{T_b} \dots\dots\dots \text{式(3)}$$

ここで、 N_{bi} : 土壌が装荷されていない時の時刻 i のバックグラウンド計数率 (s^{-1})

T_b : バックグラウンド計数時間 (s)

E_b : 高密度補正係数 (無次元)

Z : 自己しゃへい効果補正係数 (無次元)

6) 検出系の温度・湿度変動の対応

検出器は、IP54防塵形、防沫形相当の密閉容器に収納してコンベアBC2にセッティングし、外気の温度・湿度の変化に影響を受け難い設計とした。特に温度変化に対しては、 $NaI(Tl)$ シンチレーション検出器に温度補償機能を持たせ、温度変動による測定への影響が小さくなるように配慮した。

7) 検出系の振動・衝撃の対応

コンベアなどの駆動機器からの振動や衝撃による影響を軽減するため、放射能検出部は独立

した筐体として設計した。検出部は、コンベアBC2の上側ベルトの下に差し込みできる構造とした。図6に放射能検出部の外観を示す。



図6 放射能検出部の外観

4. 実証試験結果

2項で設計・製作した実証機の実証試験を福島県内の某地区で基準線源と実土壤を使用して実施した。

実証試験では、第1ステップとして、土壤形状・寸法の変化に対する式(2)の補正計算の妥当性を検証した。線源は、幅220mm、高さ90mm、長さ370mmの容器内部にCs-137を添加したアルミナを封入したブロック線源であり、6個使用した。表2に示す形状・寸法に積み上げて4パターンの形状・寸法について検証を実施した。各パターンの線源を放射能検出部の中央に配置して、計数率を測定した。バックグラウンド計数率は、上記の線源と同一形状の容器に水を封入したものを同位置に配置して測定した。この結果から各パターンの正味計数率を算定した。一方、各パターンの線源の形状寸法、嵩密度などのパラメータから式(2)より放射能換算係数を計算し、これに当該線源の放射能値を乗じて予測される計数率を計算した。上記の計算により求めた計数率を基準値とする正味計数率の誤差を算定した。判定基準値±12% (線

表2 補正計算妥当性検証結果

パターン	線源の形状・寸法	ブロック線源での検証結果					実土壤ブロックでの検証結果				
		測定計数率 (s ⁻¹)	BG計数率 (s ⁻¹)	正味計数率 (s ⁻¹)	計算値 (S ⁻¹)	誤差 (%)	測定計数率 (s ⁻¹)	BG計数率 (s ⁻¹)	正味計数率 (s ⁻¹)	計算値 (S ⁻¹)	誤差 (%)
パターン1		45.056	26.265	18.791	18.610	1.0	3858.798	30.163	3828.635	3794.000	0.9
		45.142	26.257	18.885	18.610	1.5	3854.498	30.498	3824.000	3794.000	0.8
		45.228	25.538	19.690	18.610	5.8	3853.912	30.595	3823.317	3794.000	0.8
		平均値					2.8	平均値			
パターン2		43.703	26.533	17.170	17.082	0.5	3305.883	30.492	3275.391	3416.680	-4.1
		44.230	26.233	17.997	17.082	5.4	3307.117	30.837	3276.280	3416.680	-4.1
		43.862	26.907	16.955	17.082	-0.7	3302.960	30.767	3272.193	3416.680	-4.2
		平均値					1.7	平均値			
パターン3		41.905	27.223	14.682	14.453	1.6	3085.838	30.072	3055.766	2956.770	3.3
		41.642	26.985	14.657	14.453	1.4	3085.822	30.010	3055.812	2956.770	3.3
		41.717	27.003	14.714	14.453	1.8	3083.960	30.348	3053.612	2956.770	3.3
							1.6				
パターン4		44.902	30.725	14.177	13.015	8.9	2783.025	34.073	2748.952	2690.400	2.2
		44.548	30.877	13.671	13.015	5.0	2782.643	34.288	2748.355	2690.400	2.2
		44.550	30.208	14.342	13.015	10.2	2783.110	33.915	2749.195	2690.400	2.2
		平均値					8.1	平均値			
判定基準値					±12以内	判定基準値					

表3 実土壤に体する放射能濃度測定結果

対象土壤	測定バッチ	本装置の測定値	Ge半導体検出器による分析値	比重 (g/cm ³)	平均誤差 (%)
		(Bq/kg)	(Bq/kg)		
フレコン-1 農地	1	3,673	3,670	1.41	0.8
	2	3,849	4,000	1.41	
	3	3,616	3,800	1.38	
	4	3,830	3,700	1.38	
フレコン-2 宅地 (庭土)	1	15,257	16,500	1.41	-5.2
	2	15,472	16,500	1.34	
	3	16,503	17,700	1.36	
	4	16,687	16,700	1.33	
フレコン-3 農地	1	12,080	10,100	1.41	13.8
	2	11,585	10,900	1.43	
	3	12,362	10,700	1.41	
フレコン-4 宅地 (庭土)	1	28,643	26,100	0.95	6.2
	2	28,303	26,200	0.93	
	3	26,821	27,500	0.96	
	4	29,952	27,400	0.95	
フレコン-5 道路 (砂利混土壤)	1	8,988	8,200	1.33	2.3
	2	8,393	8,600	1.36	
	3	9,775	9,300	1.38	
	4	8,712	9,000	1.36	

源の放射能誤差±10%、長さ補正誤差±5%、高さ補正誤差±5%、幅補正誤差±1%の二乗和の平方根)に対して最大で8.1%の誤差であり、補正計算が妥当なものであることが確認できた。さらに、上記の線源と同一形状・寸法の容器に、事前にGe検出器で放射能濃度を測定した実土壤(Cs-134+Cs-137)を封入した実土壤ブロックを6個製作した。ブロック線源と同様の試験と計算を行い判定基準値±12%に対して最大で-42%の誤差であり、補正計算が妥当であることを確認した。

第2ステップとして、種々な実土壤に対して測定を行い、総合誤差を測定した。実土壤は事後に外部の検査機関にてGe検出器で測定バッチ単位で放射能濃度の測定を実施した。表3に測定結果の一例を示す。同表は現地の宅地(庭土)、農地、道路(砂利混土壤)から採取した4種類の土壤について測定を実施した結果である。土壤の各測定バッチの誤差は、判定基準値±20%内であり、土壤の平均誤差でいうと、最大で13.8%であり、目標とする性能を満足することが確認できた。

5. あとがき

中間貯蔵施設向けの土壤濃度判定機の開発として、設計・製作した実証機の概要、開発のポイント、実証試験結果について紹介した。実証試験では、目標とする総合誤差±20%の高い性能を有することが確認でき、8000Bq/kgの基準値に対して6400Bq/kgのスクリーニングレベルで正確に分別できることを証明できた。

今後は、中間貯蔵施設における土壤の必要処理量と土壤の放射能濃度測定が必要な工程などを明確にし、コンベア幅やコンベア速度の拡大による処理能力アップと使い勝手の向上を目指して実機の設計を進めて行く所存である。

参考文献

- 1) 中島他、安全・安心に貢献する放射線管理ソリューション、富士技報 Vol87 No.1 2014
- 2) 厚生労働省、食品中の放射性セシウムスクリーニング法、2012
- 3) JIS Z 4342-2013 シンチレーション式放射能測定器—食品中のγ線放出核種
- 4) 環境省「除染情報サイト」中間貯蔵施設について
- 5) パンフレット「除染土壤などの中間貯蔵施設について」環境省除染情報サイト

ITERトロイダル磁場コイル構造物製作技術開発活動の紹介

Introduction about Development for Manufacturing of Structure for ITER Trooidal Field Coil

山田 弘一* 新見 健一郎* 井口 将秀**
 Hirokazu Yamada Kenichiro Niimi Masahide Iguchi
 中平 昌隆** 小泉 徳潔**
 Masataka Nakahira Norikiyo Koizumi

〔概要〕

国際熱核融合実験炉（ITER：International Thermonuclear Experimental Reactor）プロジェクトにおける日本の分担のひとつとして、プラズマ形成のためのトロイダル磁場を発生させるトロイダルコイルの製作があげられる。現在はITER建設フェーズの中で実機調達が着々と進められ、全19機のうち約半数までの実機調達契約がなされた状態である。

当社はこれまで、日本原子力研究開発機構、(株)東芝殿とともに、本機器で適用される特殊鋼を取り扱うための製作技術開発として、溶接技術や検査技術の確立を行ってきた¹⁾。

本書では、TFコイル構造物の具体的な形状仕様に即した製造技術開発として、当社が日本原子力研究開発機構殿と共に行った製作技術開発R&D活動を紹介するものである。

1. 緒言

国際熱核融合実験炉（ITER：International Thermonuclear Experimental Reactor）は、核融合エネルギーの実現を目指し、世界7極が参加する大型国際共同プロジェクトである。ITERではプラズマの形成・閉じ込めに、トカマク型磁場閉じ込め方式を採用しており、そのための各種コイルが重要設備の一つに位置づけられる。プラズマ閉じ込めには、強い磁力線の籠に例えられるドーナツ状の強磁場の形成とプラズマへの電流駆動や位置・形状の制御磁場の形成が必須であり、前者のためのコイルを「トロイダル磁場コイル」、後者を「ポロイダル磁場コイル」と呼ぶ²⁾。これらのコイルは、高い磁場の形成を長時間続けるため、超伝導コイルとすることが不可欠である。そのためコイル本体を中心に、超伝導状態をつくるための冷却媒体である液体ヘリウムの供給システムや、発生する電磁力でコイル自体が変形しないよう、所定の形状に保持するための構造物などで構成される。

上記2種類のコイルのうち、トロイダル磁場コイル（以降、TFコイル）はITERプロジェクトの中で日本が製造を担当する機器である。ITERでは予備1機を含めた計19機のTFコイルが製作される予定であり、日本は、9機分のTFコイル製作と、EUで製作されるコイル用の構造物10機分の製作を担当する。

2. 機器仕様

TFコイルの概要を図1に示す。TFコイルは、ドーナツ状のプラズマを輪切りにするように配置し、内部の導体に電流を流すことで、トロイダル（トラス）方向に発生させた磁場でプラズマを閉じ込めるための機器である。ITERのTFコイルは、高さ14m、幅9m、重さ300トンに及び、世界最大のD型コイルである。磁場の発生に伴い、内部導体には、単位長さ当たり最大約80トンの電磁力がかかるため、90本の超伝導素線と522本の銅線から構成される燃線はラジアルプレートと呼ぶステンレス鋼製の溝板で保持され、さらにそれがステンレス鋼の構造物に保持されている。

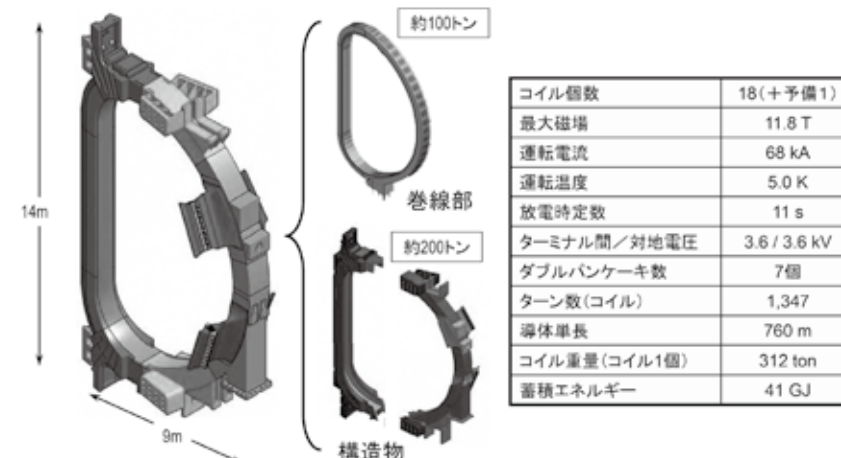


図1 トロイダル磁場コイル 概略仕様³⁾

トラス状に並べられたTFコイルは、磁力線と電流のコイルに向心力が生じ、トラス中心側のコイル内部に電磁力により局所的最大応力を生じる。そのためTFコイルは、その形状をD型とすることで、応力を緩和させコイル内部に発生する応力を均一化させている。

TFコイルの構造については、前述のとおり、トロイダル磁場を発生させるコイル本体と超伝導環境を形成させるための低温冷却系（液体ヘリウム循環系）、それらを所定形状で保持するための構造体に分けられるが、このうち当社は、超伝導環境となる4Kで発生する電磁力に耐えてコイルを所定形状に保持する機能が求められる構造物の製作に関するR&Dを行った。TFコイル構造物は、全体形状としてはD型に綴じた四角柱といった形状であるが、極低温での強度以外にも、他機器との取り合いやTFコイル構造物同士の取り合いなどの様々な要求仕様があるために、極厚の特殊材料を過去経験のないくらい複雑、かつ精密に仕上げなければならない。特に、隣接するTFコイル構造物との取り合いにもなる、ドーナツの内側に配置される内側構造物と呼ばれる部位の要求仕様は厳しく、加工や溶接施工による変形や歪制御に関する一般的な大型構造物製作の知見が、そのまま適用できない課題があった。次項では上記の各種課題に対して当社が行ったR&D活動について紹介する。

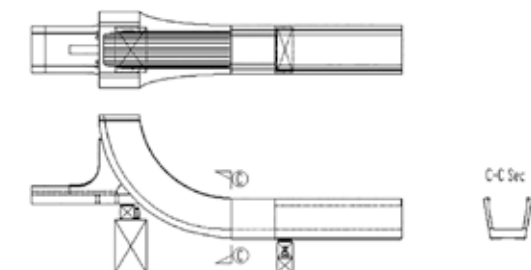


図2 TFコイル内側構造物 構成部位間接合に関する試作体 外略図

3. 実施内容

本R&Dでは大型構造物同士の溶接による変形量を評価し、変形が生じた場合の対策として接合後の歪矯正に関してモックアップ試作を伴う検討を行った。加えて、極低温条件を維持する機能を持つヘリウム循環配管設置の施工性に関する検討を行った。

3.1. セグメント間接合による溶接変形量の評価

TFコイル内側構造物は上下部と、その中間部分の3つのブロック（セグメント）から構成されている。そのため各セグメント同士の溶接接合に際しては角変形量の把握とその抑制が必須である。その課題に対し、当社は実機大の試作を行い、溶接変形量の把握とその低減対策に関するR&Dを行った。

試作体の概略図を図2に示す。

本試作試験の結果、接合時の開作形状の最適化や逆ひずみの設定などにより、溶接による角変形量の低減・制御が可能であることを確認した。

* 川崎重工業(株) プラント環境カンパニー

** 日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 超伝導コイル開発グループ

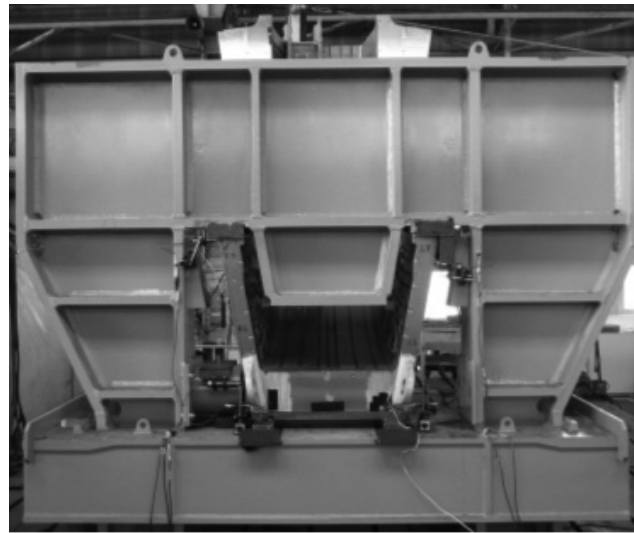


図3 TFコイル内側構造物 矯正試験状況

3.2. 構造体の歪矯正

TFコイル構造物はその形状仕様に対する要求条件が厳しく、溶接により許容できない変形が発生した場合、再製作という事態が懸念される。内側構造物だけでも100tにも及ぶ機器であり、素材調達のコストや製作期間を踏まえると再製作は現実的に不可能である。そのため、想定した許容値を超える変形が発生した場合、歪矯正を適用することで製作過程での許容範囲外の変形を解消するといった製作技術が必須である。これに対し当社は実機規模の試作品に対し矯正試験を適用し、変形の修正が可能かどうか検証を行った。図3に試験状況を示す。

開発した専用の歪矯正治具を用いて、セグメント端部の歪を矯正することにより、セグメント同士の接合部の目違いを冷間状態で、矯正することが可能であることを確認した。

3.3. 低温冷却配管の施工性

TFコイル自体を極低温に保持するためTFコイル構造体の内外面には液体ヘリウム配管が配置されているが、低温環境を構成させるため、特に構造体内面溝に沿って配置される配管は、非常に複雑な三次元曲げで構成されており、かつ密集している。このため、冷却配管の曲げ加工や、TFコイ

ル構造体内への据付施工性に関する検証が必要であった。

配管の三次元曲げや集合配管部の試作を行い、施工性を確認した結果、最適な配管の配置や溝形状の設計合理化を検討し、施工可能な配管設計を提案した。

4. 結 言

ITERにおける日本調達機器であるTFコイル製作に必要な製造技術に関して当社が実施したR&D内容に関する紹介を行った。なお、TFコイルは実機調達契約がなされ、ITER機構およびJADAで設計が進められた詳細形状に基づいて、製作が進められている。

参考文献

- 1) 井口 将秀, et al “ITERトロイダル磁場コイル構造物の製作技術開発” 低温工学 47巻3号 2012年
- 2) 関 昌弘 編, “核融合工学概論” 日刊工業新聞社, 2001.9.28.
- 3) 奥野 清, International Business Forum for Fusion/Fission Energy 2009 発表資料より

品質保証部会の活動紹介

-なぜなぜ分析参考書の紹介-

Introduction of the Activity of the Quality Assurance Section - Introduction of the Reference Book of the Why-Why Analysis -

新田和彦*	高橋正昭*	梅津博幸*	長浜哲志**
Kazuhiko Nitta	Masaaki Takahashi	Hiroyuki Umetsu	Tetsushi Nagahama
		斉藤利二***	江川裕二****
		Toshiji Saitoh	Yuji Egawa

〔概要〕

品質保証部会は、品質保証活動、品質管理に関する国内外の新しい動向や役立つ情報などを調査収集することを活動方針としている。そこで、FAPIG各社の品質保証活動の改善と向上および品質管理の実務に役立てることを目的として、情報の相互共有化を図りつつ活動を行っている。その活動の中で、2011～2012年度にかけて、なぜなぜ分析（N5分析）のポイントをまとめた参考書を策定し、現在は、各社において参考書に基づき実践を図っている。本稿は、品質保証部会の活動を紹介するとともに、なぜなぜ分析の参考書の概要を述べるものである。

1. 品質保証部会の活動全般

品質保証部会（以下「部会」）では、FAPIG各社が異業種であることを考慮し、原子力関連の品質保証活動や品質管理に関する新しい動向や情報を調査収集し、相互の共有化を図るよう適切なテーマを選定し、活動している。ここ数年のテーマは以下の通りである。

- (1) QA活動テーマの調査検討
 - a. 原子力安全文化醸成活動の調査研究
 - b. なぜなぜ分析の参考書策定 など
- (2) 関連法規、規格、指針類の改定および運用動向などの調査検討
 - a. 原子力安全のためのマネジメントシステム規格（JEAC4111）および同規格の適用指針（JEAG4121）の改定および運用動向
 - b. 品質マネジメントシステム規格（ISO9001：2015）の改定動向
- (3) 外部委員会などの活動状況および品質保証諸活動の報告・紹介・意見交換

- a. 品質保証に関する外部委員会活動状況の報告
- b. 各社の特徴ある品質保証活動トピックスの紹介と意見交換

2. 各社の貢献と成果

2.1. 情報提供と課題解決

部会には、品質保証を担当業務としているメンバーが各社から参画しており、それぞれの課題を持ち寄り、他社の経験や意見を参考にできる他の組織には見られない場となっている。

各社が持ち寄る情報には、認証機関による指摘事項の概要などが含まれており、非常に有用な参考情報となっている。情報を提供した会社にとっては、その指摘事項への対応に関し、参画各社から意見を聴取し自社での取組の参考とすることができる。なお、顧客名称や業務件名などは公開していないことを念のため記しておく。

また、法規制および規格改正にいち早く対応した会社からは、それらの情報整理結果、対応方針・対応結果などの他社メンバーの担当業務に直結し

* 富士電機(株) 発電プラント事業部 原子力品質保証部

** 清水建設(株) 原子力・火力本部

*** 川崎重工(株) プラント・環境カンパニー 品質保証部 品証二課

**** (株)荏原製作所 風水力機械カンパニー 企画管理統括部 品質保証室

た有用な情報が提供されることも本部会の活動意義を高めている理由である。

2.2. 活動成果

2003年10月の省令改正により、事業者においては日本電気協会品質保証規格JEAC4111による品質マネジメントシステムを確立し、原子力施設での保安活動を展開している。

そのうち安全に係る事項、頻発事象および組織として問題が潜在化している不適合に関しては、以下の根本原因分析に関する規制要求があることから、応急処置的な対応に止めず、組織的な問題点まで踏み込んだ原因の追究と、再発防止を図ることを意図し根本原因分析（RCA：Root Cause Analysis）を行うこととしている。

【参考】 根本原因分析に関する規制要求
 ○ “実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則”（抜粋）
 （保安活動の改善）
 第七条の三の七 品質保証計画における保安活動の改善に関する事項は、次に掲げる事項とする。
 二 生じるおそれのある不適合を防止するための予防に関する処置に関する手順（第十九条の十七各号に掲げる事故故障等の事象その他が発生した根本的な原因を究明するために行う分析（以下「根本原因分析」という。）の手順を含む。）を確立して行うこと。

原子力施設に製品や役務を供給するFAPIG各社では、すでにISO9001の認証取得を行い、不適合に関する是正処置を展開しており、RCAに限らず各社にとって適する手法で分析していた。ところが、トラブル発生時には顧客との契約などによりRCAが要求されつつあり、FAPIG各社においても早急にRCA手法を理解し、実践できることが必要となってきていた。

RCA手法の基本であるなぜなぜ分析は、再発防止策を得るために原因を見出すことを目的として行われる。しかし、なぜなぜ分析については、各社が抱える以下の問題があった。

- (1) 教科書¹⁾は数多く、手法の体系的な理解や利用する書式はそれらを参照することである程度のポイントは理解できるが、各社が実践して導き出した経験的な分析ポイントを体系的かつ簡潔にまとめたものがない。

- (2) 外部講習も多く企画されているが、導入教育のようなもので、実例に沿った分析を体験できない。
- (3) 不適合対応で、顧客や社内から組織要因を含めたより精度の高い原因分析を要求される傾向にある。
- (4) RCAの基礎としてなぜなぜ分析手法を体系的に理解したい。

そこで、上述の理由から分析力をより向上させるために、実践を見据えた真の原因を見出すポイントをもとめた簡潔な手引書の出現が求められていた。

そこで、部会自らが取組み、分析力を向上させることのできる実践を見据えた手引書を作成することとした。手引書は、2011～2012年度の活動において、部会参画各社の経験を反映し、分析のポイントを集大成した『なぜなぜ分析手法による原因分析の参考書』としてまとめることができた。なお、参考書をまとめるにあたっては、トラブルなどの原因分析だけではなく、業務改善や方針設定の場面でも活用されるものとするとも考慮した。

2.3. 参考書の活用

一般的にはRCAを実施する機会は、類似する不適合が繰り返し発生している場合や原子力安全に重大な影響を与える不具合が発生した場合となる。しかしながら、顧客によっては単独の不適合においてもRCAを求めるケースがあり、FAPIG各社にとってはその分析結果をできうる限り早期に顧客へ提示する必要性が生じてくる。

そこで、分析チーム立ち上げ時にチームメンバーのRCAに関する理解をそろえるために、また、実際の分析において参照するためにこの参考書が有用なものとなる。もちろん、教育計画の一環として行われる根本原因分析研修などの教育資料として有用であることは言うまでもない。

3. なぜなぜ分析手法について

なぜなぜ分析とは、現象を発生させている要因を、思いつきで考えるのではなく、規則的に、順序良く、漏れなく出しきる分析手法であり、なぜなぜと、結果から原因（要因）を列挙しながら究明していく分析手法である。なぜなぜ分析の考え方が特徴を以下に示す。

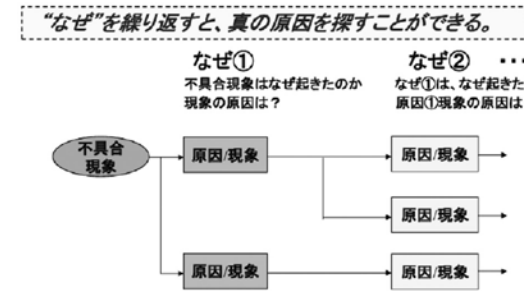


図1 なぜなぜ分析の概略

- (1) 一つの現象に関して、複数の要因を考える。
- (2) 理論的に正しく“なぜなぜ”を繰り返し、真の原因を追究する。
- (3) 真の原因に対して対策を立てる。

図1になぜなぜ分析の概略を示す。このように理屈を考えて“なぜ”を複数回繰り返すと、真の原因を探ることができると思われる。

4. 参考書の概要

2.2項で述べた参考書は、各社の貴重な経験（分析のポイント）を集大成したものであり、なぜなぜ分析の手順に沿って、図2に示す項目に沿って整理し策定した。本項では参考書に記載した分析のポイントを述べる。

4.1. 分析要員の育成

なぜなぜ分析を実施する要員が具備すべき要件は、以下の通りである。

- (1) 設計、設備などの実務を理解していること。
- (2) 品質マネジメントシステムを理解していること。
- (3) なぜなぜ分析手法を理解していること。

なかでも、なぜなぜ分析手法を理解していることが必要である。これには教科書による座学や外部研修を受講し、分析の実践を積んだ者であることが望ましい。経験を積むためには、社内外研修や社内で行う実際のなぜなぜ分析に参加させ習熟させる方策がある。

4.2. 分析チーム

なぜなぜ分析の実施前に分析チームを編成する。編成にあたっては、以下を考慮すると良い。

- (1) 分析作業は、各部門・部署の協力を得て調査・分析を行う。

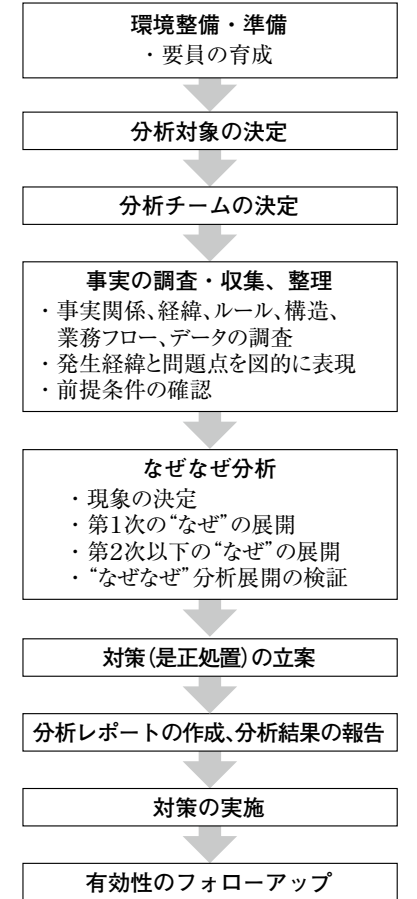


図2 参考書の記載項目

- (2) リーダーは、なぜなぜ分析に関する教育を受け、業務の実務経験を有するか理解していることが必要である。
- (3) 分析中の議論の発散を防ぎつつ効率的に進めるためには、チームのメンバー数は5人前後が望ましい。
- (4) 可能であれば、第三者的な者をメンバーに入れる。このことにより偏りや決め付けた議論を避けることができる。

4.3. 準備

憶測や誤った情報でなぜなぜ分析を行うと真の原因が特定されず、同じ事象が再発する。これを防止するには、分析の前に理解すべき現場の状況、当時のルールなどの収集整理を行い、正しい事実関係と実態を把握する必要がある。

以下に準備として必要となる調査・収集、整理項目を示すが、これらは、資料やデータの入手や

関係者からの聞き取りによって行うことになる。

(1) ハード的（製品など）現象が分析対象の場合
製品品質や作業効率、4M（人、機械、材料、方法）が最適になっていることで維持されていることが知られている。そのため、問題となっている部分の仕組み（構造）や役割（機能）をしっかり理解する。それには、図面、仕様書、動作原理、物理的/化学的 原理の確認、事象の時系列、4Mと3K（環境、季節、気温）の理解、5W1Hによる現象把握、写真などを収集、準備する。

(2) ソフト的（業務面）現象が分析対象の場合
問題となっている業務の手順や流れを明確にし、その業務の役割を再認識する。それには、体制、ルール、役割分担の確認、関係者のコミュニケーションを時系列に整理した図表、5W1Hによる事象把握などを収集、準備する。

4.4. 分析

分析は、3項で述べたように現象に対して要因を列挙していくが、その時のポイントを以下に述べる。

- (1) 共通
 - 1) 主語は1つとし、「・・・が、・・・した」というワンカット表現にする。
 - 2) 文章で理解し難いときは、図表で補足説明を行う。
 - 3) その裏返しが対策となるまで、“なぜ”を繰り返す。
 - 4) 個人の心理面や精神面ばかりを追究しない。
 - 5) 可能な限り定量的な表現とする。
 - 6) 言い訳でなく、事実を表現する。

(2) 第1次の要因（図3参照）

- 1) ハード的事象については、現象に対する直接的なもの、原理/原則的なものを第1次の要因（“なぜ”）とする。
- 2) ソフト的事象（人為ミスなどヒューマンエラーが絡むもの）は、作業手順を動作単位に分解して、あるべき行動と比較し、異なる行動を第1次の要因（“なぜ”）とする。ここで異なる行動とは、本来、要領、ルール、決め事などによりやるべきであった行動から逸脱した行動（または作業に係る弱点）である。

3) ヒューマンエラーなどを扱う場合は、M-SHELLモデルの各要素の観点で原因を列挙することを意識する²⁾。

(3) 第2次以降の要因（図4参照）

- 1) 要因（“なぜ”）を漏れなく出し切るには、4M（機械、人、材料、方法）の観点、時系列順、発生場所の近い順を考慮して要因を並べる。
- 2) 第n次の要因（“なぜ”）を出すには、出された要因（“なぜ”）が全て発生することで、その前の第n-1次の要因（“なぜ”）が発生するかどうかという観点でチェックし、要因（“なぜ”）を出し切る。こうして要因の過不足をなくす。
- 3) 要因の事実関係を現場などで調査し、事実と違ったら、それ以上分析をしない。

4.5. 分析の検証

なぜなぜ分析がまとめの段階になったら、論理的に誤りがなにか検証を行う。これは、真の原因となった最後のなぜから現象まで、“だからだから”（または“のでので”）と遡って、論理的に無理や飛躍がないことをチェックするものである。なお、

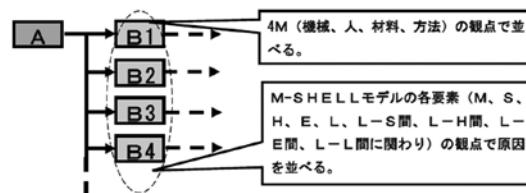


図3 第1次の“なぜ”の並べ方のポイント

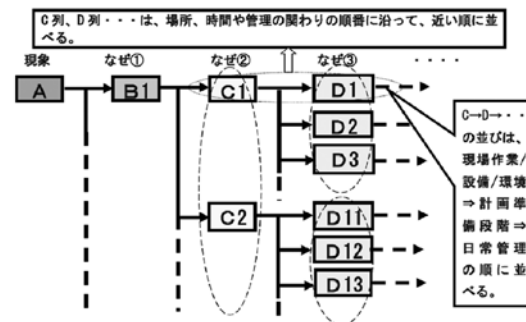


図4 なぜなぜの並べ方のポイント

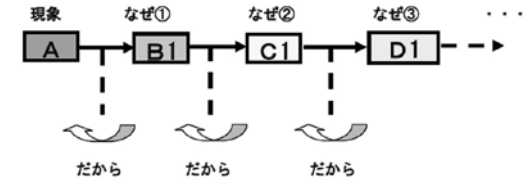


図5 なぜなぜ展開の検証事例

分析途中でも、その都度行うことでも良い。筋が通らない場合は、もう一度要因の並び替えと過不足の修正を行う。（図5参照）

4.6. 対策の立案

基本的には、最後の“なぜ”の裏返しを対策とするが、それ以外の対策案を数多く出すと良い。これには、ブレインストーミングなどを活用することになる。

対策案を出す段階では、以下に留意する。

- (1) 最後の“なぜ”の裏返しを対策にする。
- (2) 裏返しの対策以外の対策もないか考える。（対策案は多いほど良い。）
- (3) 対策は、“応急処置”と“再発防止対策”の両方を考える。
- (4) 奔放な対策案を歓迎する。
- (5) 対策として教育・訓練や周知徹底も重要である。

なお、効果的な対策案とは、可能な限り不適合を再発させないように配慮したものである。これには以下を考慮して対策案を立案する。

- (1) システムや手順の改良（ルール/手順書の見直し）
- (2) 発生しても、気付ける体制や仕組みへの改良
- (3) フールプルーフの5原則を考慮

4.7. 対策の絞り込み

立案した対策案の全てを実施することは現実的でないことが多く、対策を絞り込むことを行う。対策の効果として、有効性、即効性、持続性と難易度などの観点から評価を行う。参考として表1に優先度の優劣のイメージを示す。

評価は、以下のいずれかにより行い、優先度を決定する。

- (1) 評点による評価
リスクマネジメントなどで行われている方法として評点や評価方法（評点の積あるいは和などに

表1 対策の優先度の例

項目	効果			実施時期	難易度	経済性	一般性	優先度
	有効性	即効性	持続性					
評価基準	機器改善							↑高 ↓低
	作業改善	効果が直ぐ現れる	効果が持続する	直ちに実施可能	比較的容易	費用小		
	手順書・管理方法改善		効果が得られる可能性がある	準備に1年以内	条件が合えば容易	費用大	他にも適用できる	
	周知徹底	時間がかかる		1年以上	困難		適用できない	

段階	No	ポイント	チェック
分析	14	推測した原因を含めて書かなかつたか。(先入観の入った表現を排除する。)ただし、推測した場合は、それを識別して記載する。	
	15	表現が難しい場合は、現物を目の前に分析するか、その状態を絵に描く等の工夫をしたか。	
	16	ハード的事象については、現象に対する直接的なもの、原理/原則的なものを選んだか。 ソフト的事象(人為ミス等ヒューマンエラーが絡むものは、作業手順を動作単位に分解して、あるべき行動と比較し、異なる行動を書いたか。	
	17	事象やなぜの表現は、主題を記載しているか。	
	18	4M(機械、人、材料、方法)の観点で原因を並べたことを意識したか。	
	19	ヒューマンエラー等を扱う場合は、M-SHELLモデルの各要素の観点で原因を並べたことを意識したか。	

図6 なぜなぜ分析チェックシート（抜粋）

よる）をあらかじめ決めておき、その評点から優先順位を決める。

(2) 関係者による相談

関係者による相談で優先順位を決めることでも問題ない。

4.8. 自己チェックシート

参考書では、分析のポイントをまとめたものとして独自のチェックシートを提案した。分析の終了時にチェックシートを利用してチェックすることで分析の精度が上がることを期待している。（図6参照）

4.9. 分析レポート

分析チームは、対策の実施前に分析レポートを作成し、組織のルールに則って分析結果の報告とその後の実施に関する了解を得ることが良い。

4.10. 対策の実施

優先順位をつけ絞り込んだ対策を計画立てて実行する。実行中にあつては、以下に留意する。

- (1) 対策は、やってみなければ効果が分からないという面があることを理解しておく。
- (2) 対策が定着するよう基準や標準の制定にて標準化を行い、関係者全員へ周知徹底を図る。
- (3) 効果がない場合は、他の対策に切り替える。

- (4) 狙った作業の結果の効果だけでなく、前後工程（プロセス）に何か影響を与えていないかを確認する。
- (5) 対策は、作業のやり方の変化や変更を伴うので、従来なかった悪さが出るという負の効果があることを認識しておく。このようなことが発生した場合は、対策を取りやめるか、対策を修正する、または追加対策を行う。

4.11. 有効性のフォローアップ

是正処置または予防処置のルールを適用して展開するのが良い。レビューにあたっては、以下の視点を含め、再発を起こしたり効果がない場合は、対策を再考する。

- (1) 再発の傾向の有無
- (2) 改善の実効性

4.12. 分析例

参考書では、分析のポイントだけでなく、分析の結果の程度を理解できるように、各社で実際に起きた不適合に対するなぜなぜ分析シートの実例を添付した。

5. あとがき

品質保証部会参画各社においては、なぜなぜ分析を効率的に実践することに試行錯誤せざるを得ない状況を受け、2011～2012年度の品質保証部会の活動として、なぜなぜ分析の参考書を策定した。これには、各種教科書の内容に加えて各社の経験を盛り込んだものとした。

FAPIG参画会社の不適合管理と是正処置においてなぜなぜ分析は、重要な手法となっており、本稿および参考書で提示した方法が参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 例えば、小倉仁志、なぜなぜ分析10則、日科技連(2011)
JIPMソリューション・なぜなぜ分析研究会、「なぜなぜ分析」習得の7ステップ、JIPMソリューション(2009) など
- 2) 塚原利夫、事象分析の手法と考え方、クオリティマネジメント、Vol.62 No.12 (2011) pp.46-54

FAPIG の 機 構 (社名 ABC順)

(平成26年7月1日現在)

理 事 会・委 員 会・専 門 部 会・事 務 局

会 長	藤 原 正 洋	富士電機執行役員	理 事	藤 木 靖 久	みずほ銀行常務執行役員
副 会 長	渡 辺 達 也	川崎重工業執行役員	〃	三 浦 宣 明	清水建設執行役員
〃	水 井 聡	双日専務執行役員			
理 事	喜 田 明 裕	荏原製作所執行役員	監 事	島 田 昌 寛	みずほ銀行営業第十部次長
〃	山 田 昌 彦	富士通TCソリューション事業本部長	事務局長	片 岡 昇	
〃	佐 藤 哲 哉	古河電気工業取締役・執行役員専務			
〃	中 村 晋	古河機械金属常務取締役			

FAPIG委員会および専門部会

(◎は委員長または部会長, ○は副委員長または副部会長)

企画委員会

- ◎ 尾 崎 博 (富 士 電 機)
- 荒 井 正 幸 (荏 原 製 作 所)
- 山 田 裕 之 (富 士 電 機)
- 竹 辺 晴 夫 (〃)
- 國 澤 有 通 (富 士 通)
- 西 本 貞 矢 (古 河 電 気 工 業)
- 大 田 彰 則 (古 河 機 械 金 属)
- 松 並 清 隆 (川 崎 重 工 業)
- 飯 田 浩 一 (み ず ほ 銀 行)
- 姫 野 洋 一 (清 水 建 設)
- 西 尾 弘 毅 (双 日)
- 片 岡 昇 (事 務 局)

オブザーバー

- 来 山 正 昭 (原 燃 工)

広報委員会

- ◎ 片 岡 昇 (事 務 局)
- 倉 島 昇 (荏 原 製 作 所)
- 竹 辺 晴 夫 (富 士 電 機)
- 伊 藤 貴 代 (〃)
- 才 川 美 紀 (〃)
- 笹 野 貢 (富 士 通)
- 柴 原 資 典 (古 河 機 械 金 属)
- 佐 藤 康 士 (川 崎 重 工 業)
- 新 保 孝 之 (み ず ほ 銀 行)
- 門 脇 秀 宜 (清 水 建 設)
- 和 田 真 奈 (双 日)

原子力情勢調査部会

- ◎ 村 野 博 一 (双 日)
- 北 西 啓 一 (富 士 電 機)
- 羽 田 野 泰 彦 (荏 原 製 作 所)
- 三 澤 真 (富 士 通)
- 佐 藤 康 士 (川 崎 重 工 業)
- 新 田 康 男 (清 水 建 設)
- 齋 藤 正 直 (清 水 建 設)

高温ガス炉プロジェクト部会

- ◎ 岡本太志 (富士電機)
- 吉澤 顕 (双 日)
- 大橋一孝 (富士電機)
- 毛利智聡 (川崎重工業)
- 斎藤正直 (清水建設)
- オブザーバー
- 大橋準平 (原 燃 工)

廃止措置・廃棄物処理プロジェクト部会

- ◎ 武仲五月 (川崎重工業)
- 村上知行 (富士電機)
- 荒井正幸 (荏原製作所)
- 前園伸也 (富士電機)
- 三澤 真 (富 士 通)
- 鳥居和敬 (清水建設)
- 沢本雅弘 (双 日)

品質保証部会

- ◎ 高橋正昭 (富士電機)
- 斉藤利二 (川崎重工業)
- 江川裕二 (荏原製作所)
- 梅津博幸 (富士電機)
- 新田和彦 (ﾎ ﾂ ﾎ ﾂ)
- 鈴木啓司 (ﾎ ﾂ ﾎ ﾂ)
- 鈴木信太郎 (富 士 通)
- 長浜哲志 (清水建設)
- 吉澤 顕 (双 日)

事務局

局長 片岡 昇

禁無断転載

FAPIG No.188

平成26年9月8日印刷

平成26年度 第1号

平成26年9月12日発行 (非売品)

発行所 第一原子力産業グループ事務局
〒100-8691 東京都千代田区内幸町2丁目1-1
双日(株)内
電 話 (03) 6871-3082

ホームページ: <http://www.fapig.jp/>

編集兼発行人 片岡 昇

印刷所 ミズノブリテック(株)
〒104-0042 東京都中央区入船2-9-2
電 話 (03) 5566-6677(代)

SYNOPSIS

Kazutaka Ohashi, Tomoaki Mouri, Masanao Saito, Hiroki Nishio, Junpei Ohashi, Futoshi Okamoto

**Development Status of the HTGR in the World
-Outline and Construction Status of the Demonstration
HTGR Program (HTR-PM) of China**
FAPIG No. 188 pp.3 ~ 8 (2014)

The report provides the outline and construction status of the High Temperature Reactor - Pebble- Bed Module (HTR-PM) demonstration plant developed in the People's Republic of China. The development program of HTR-PM is now under progress based on the experience of the construction and operation of the test reactor HTR-10. The construction of the HTR-PM started in December, 2012 and expects to achieve operation in 2017.

KEYWORDS : HTGR, high temperature gas-cooled reactor, HTR-PM, China, demonstration plant

Sadao Nakashima, Satoshi Takahashi, Akihito Hora, Mitsuru Tsuchida

Development of the Equipment for Measuring Specific Activity of Gamma-emitting Radionuclides in Soil
FAPIG No. 188 pp.9 ~ 15 (2014)

A large volume of contaminated wastes including the soil in the various grounds, plants, the sludge and so on, which were collected by the decontamination process after the accident at the Fukushima Daiichi NPP in 2011, have been placed at temporary storage sites in Fukushima Prefecture.

In order to store and manage the wastes safely and intensively until the final disposals are carried out, it is planning to construct the interim storage facilities.

When the facilities accept the wastes, they are planning that the wastes will be categorized as either Type I ($\leq 8000\text{Bq/kg}$ or) Type II ($< 8000\text{Bq/kg}$) and then will be disposed in accord with the category.

Fuji Electric and SHIMIZU CORPORATION have jointly developed the equipment coupled with automatic and sequential batch process, which measures specific activity of the soil with high accurate total error within $\pm 20\%$ and then separates the soil into two different types: Type I and Type II .

KEYWORDS : interim storage facility, specific activity in soil, Fukushima prefecture, Fukushima Dai-ichi NPP, 8000Bq/kg, automatic and sequential batch process

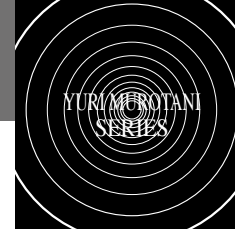
Hirokazu Yamada, Kenichiro Niimi, Masahide Iguchi, Masataka Nakahira, Norikiyo Koizumi

Introduction about Development for Manufacturing of Structure for ITER Troidal Field Coil
FAPIG No. 188 pp.16 ~ 19 (2014)

Japan is assigned the procurement of the toroidal coil for the toroidal magnetic field generation in ITER project. The procurement agreement is advanced and about half of all the 19 sets has completed.

We has performed establishment of the welding technology for the manufacturing and inspection technique for the structure of troidal field coil using the special steel applied by this apparatus with Japan Atomic Energy Agency and Toshiba Corporation. In this paper, it is shown the activity of research and development about the manufacturing technique for the concrete form specification of troidal field coil structure.

KEYWORDS : ITER, toroidal coil, welded structure



Kazuhiko Nitta, Masaaki Takahashi, Hiroyuki Umetsu, Tetsushi Nagahama, Toshiji Saitoh, Yuji Egawa

Introduction of the Activity of the Quality Assurance Section
– Introduction of the Reference Book of the Why-Why Analysis –
 FAPIG No. 188 pp.19 ~ 24 (2014)

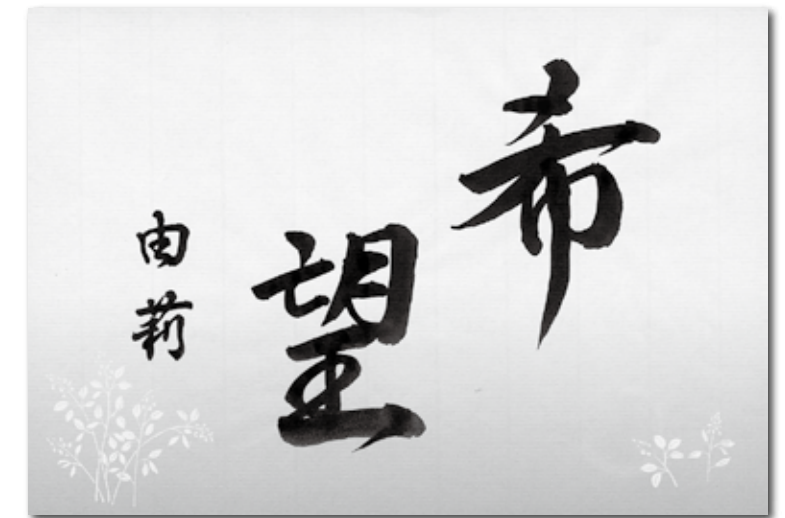
The policy of the quality assurance section of FAPIG is that an investigation collects domestic and foreign new trends or valuable information which contributes quality assurance and the quality control of the member of FAPIG.

In addition, for the purpose of modification and improvement of the quality assurance activity of the quality control in the actual business of FAPIG companies, our section has been practicing with exchanging information mutually.

In the activity during 2011 to 2012 fiscal year, our section drawn up the reference book which gathered up a point of why-why analysis.

This report introduces the contents of the reference book of the why-why analysis as activity of the quality assurance section mainly.

KEYWORDS : why-why analysis, quality assurance



書のカ～背中をおしてくれる言葉たち～
 「希望」「凜」「夢」

作者プロフィール

室谷 由莉 Yuri Murotani

富士通株式会社社員。1983年島根県生まれ。

2007年入社、国・大学などの科学技術系研究機関の担当営業を経て、現在は海外ビジネス企画・プリセールスを担当。

主な活動履歴

幼少の頃より祖母の書道教室で毛筆・硬筆の指導を受ける。

学生時代には県の書道展・書写コンクールなどで入賞。

現在は趣味のひとつとして作品づくりを続けている。

第一原子力産業グループ

The **F**irst **A**tomic **P**ower **I**ndustry **G**roup

株式会社荏原製作所

富士電機株式会社

富士通株式会社

古河機械金属株式会社

古河電気工業株式会社

川崎重工業株式会社

みずほ銀行

清水建設株式会社

双日株式会社