JAEA-Technology 2017-038 DOI:10.11484/jaea-technology-2017-038



STACY(定常臨界実験装置)施設の更新に係る モックアップ試験 (給排水システムの性能確認)

Mock-up Test of the Modified STACY (Performance Check of Water Feed and Drain System)

関 真和 前川 知之 井澤 一彦 曽野 浩樹

Masakazu SEKI, Tomoyuki MAEKAWA, Kazuhiko IZAWA and Hiroki SONO

原子力科学研究開発部門 原子力科学研究所 福島技術開発試験部

Department of Fukushima Technology Development Nuclear Science Research Institute Sector of Nuclear Science Research

| 日本原子力研究開発機構

March 2018

Japan Atomic Energy Agency

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2018

JAEA-Technology 2017-038

STACY (定常臨界実験装置)施設の更新に係るモックアップ試験 (給排水システムの性能確認)

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究開発部門 原子力科学研究所 福島技術開発試験部

関 真和、前川 知之、井澤 一彦、曽野 浩樹+

(2017年12月21日 受理)

日本原子力研究開発機構では、溶液燃料を用いる STACY (定常臨界実験装置)施設を 「棒状燃料と軽水減速材を用いる熱中性子炉用臨界実験装置(STACY 更新炉)」に更新する 計画を進めている。これまでの STACY は、炉心タンクへ供給する溶液燃料の体積を調整する 液位制御方式を採用していたが、STACY 更新炉は、炉心タンクへの減速材の給水量を調整 する水位制御方式を採用する。この水位制御について、これまでに行った基本設計の妥 当性を検証するため、実機とほぼ同一構造の設備・機器を用いた給排水系モックアッ プ試験装置を製作した。モックアップ試験では、最大給水流量の制限、給水流量の調 整、給水停止等の性能確認を行った。本書では、STACY 更新炉給排水系のモックアッ プ試験の結果について報告する。

原子力科学研究所:〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4 + 安全・核セキュリティ統括部 JAEA-Technology 2017-038

Mock-up Test of the Modified STACY (Performance Check of Water Feed and Drain System)

Masakazu SEKI, Tomoyuki MAEKAWA, Kazuhiko IZAWA and Hiroki SONO⁺

Department of Fukushima Technology Development Nuclear Science Research Institute Sector of Nuclear Science Research Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki

(Received December 21, 2017)

The Japan Atomic Energy Agency is conducting a reactor modification project of the Static Experiment Critical Facility (STACY). In the modification, STACY is to be converted from a thermal reactor using solution fuel into that using fuel rods and light water moderator. Reactivity of the modified STACY core is controlled by the water level fed in the core tank as well as the present STACY. In order to verify the basic design of the water feed and drain system of the modified STACY, we constructed a mock-up test apparatus with almost the same structure and specifications as the modified STACY. In the mock-up test, performance checks were pursued regarding limitation of maximum flow of water feeding, adjustment of the flow rate of water feeding, stop of water feeding and others. This report describes the outline and results of the mock-up test of the water feed and drain system of the modified STACY.

Keywords : STACY, Critical Facility, Reactor Modification, Water Feed and Drain System, Mock-up Test

+ Safety and Nuclear Security Administration Department

目 次

1. はじめに	1
1.1 STACY 更新の概要	1
1.2 試験目的	1
1.3 本報告書の構成	2
2. STACY 更新炉の概要	3
 STACY 更新炉の水位制御に関する主要設備	3
2.1.1 炉心タンク	3
2.1.2 給排水系	3
2.1.3 プロセス計装	4
2.2 STACY 更新炉の運転の流れ	9
3. 給排水系モックアップ試験1	1
3.1 給排水システムの要求性能	1
3.2 試験装置の概要	1
3.3 試験結果	0
3.3.1 給水ポンプ性能試験······2	0
3.3.2 最大流量の設定(初期設定)	5
3.3.3 給水流量調整性能	0
3.3.4 給水停止時間測定	6
3.3.5 最大給水時の排水性能試験4	5
3.3.6 急速排水弁の開時間測定4	8
4. まとめ	0
4.1 試験結果のまとめ	0
謝 辞	2

Contents

1. Introduction ·····	1			
.1 Outline of the STACY modification 1				
1.2 Test purpose ·····	1			
1.3 Structure of this report ·····	2			
2. Outline of the modified STACY ·····	3			
2.1 Major equipment	3			
2.1.1 Core tank	3			
2.1.2 Water feed and drain system ·····	3			
2.1.3 Process instrumentation	4			
2.2 Operation procedure of the modified STACY	9			
3. Mock-up test of water feed and drain system	1			
3.1 Required performance 1	1			
3.2 Outline of test apparatus	1			
3.3 Test results 2	0			
3.3.1 Performance test of feed water pump	0			
3.3.2 Setting of maximum flow rate (initial setting)	25			
3.3.3 Adjustment performance of feed water flow rate	60			
3.3.4 Measuring time to stop feed water	6			
3.3.5 Drain performance test at maximum feed water	5			
3.3.6 Open time measurement of rapid drain valve 4	-8			
4. Summary 55	0			
4.1 Summary of test results	0			
Acknowledgments 5	2			

1. はじめに

1.1 STACY 更新の概要

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下「原子力機構」という。)の原子 カ科学研究所の燃料サイクル安全工学研究施設 NUCEF (Nuclear Fuel Cycle Safety Engineering Research Facility)に設置されている定常臨界実験装置 STACY (Static Experiment Critical Facility)は、再処理施設等で取り扱われる溶液状核燃料(以下 「溶液燃料」という。)に関する臨界安全設計の基礎データの取得を目的とした臨界 実験装置(以下「現行 STACY」という。)である。原子力機構では、この現行 STACY を「溶液燃料を用いる臨界実験装置」から「棒状燃料及び軽水を用いる熱中 性子炉用臨界実験装置」に更新(以下更新後のSTACYを「STACY更新炉」という。) する計画を平成22年から進めている。STACY更新炉は、原子力施設の臨界基礎デー タの取得、核燃料サイクル施設に係る臨界安全データベースの確立等を目的とする。 当面の間の研究対象として、平成23年3月に発生した東北地方太平洋沖地震によっ て引き起こされた東京電力(株)福島第一原子力発電所事故を受け、当該事故で生 じた破損燃料(燃料デブリ)の取出し等に係る臨界管理技術に供する予定である。

福島第一原子力発電所事故では原子炉の炉心が損傷した。そして、大量の燃料デ ブリが生じ、圧力容器内に留まったもの及び圧力容器を貫通して格納容器へ流れ出 たものがあると考えられる。これらの燃料デブリは、圧力容器、制御棒、格納容器 コンクリート床等の構造材と混合し、通常の核燃料とは異なる組成を持つ可能性が ある。通常の核燃料に係る臨界管理には、解析手法、核燃料組成の不確かさ、燃料 体の製作精度、取扱設備の製作精度等に由来する中性子増倍率の不確かさを考慮し た安全裕度が織り込まれる。しかし、燃料デブリの臨界管理では、生成過程そのも のが不確かなこと、冷却水中の中性子毒物濃度維持等が困難なこと等から、安全裕 度をあらかじめ明らかにすることができない。このような燃料デブリの臨界管理に はリスク評価が必要であり、燃料デブリ組成の不確かさと中性子増倍率の不確かさ を臨界解析で高精度に関連付ける必要がある。このため、核データを含む臨界解析 手法の精度を臨界実験で検証しなければならない。

1.2 試験目的

STACY 更新炉に係る原子炉設置変更許可申請において規制当局による安全審査を 受けるに当たり、設計仕様に係る成立性等を確認するため、原子力機構では平成 24 年度から各種モックアップ試験を実施している。モックアップ試験とは、実機と同 型・同規模・同性能の試験装置を用いて、実機製作前にその性能等を検証する試験 をいう。STACY 更新炉のモックアップ試験では、反応度制御の成立性や運転上重要 なプロセス量の計測精度について様々な試験データを取得することを目的とする。

STACY 更新炉のモックアップ試験は、以下の4つの項目に大別される。

- (1) 給排水系モックアップ試験
- (2) プロセス計装モックアップ試験
- (3) 安全板装置モックアップ試験
- (4) その他機器のモックアップ試験

本報告書では、(1) 給排水系モックアップ試験により、給排水システムの成立性を 検証し、給排水系に要求される性能を満足する見通しについて報告する。

1.3本報告書の構成

以下、第2章では、STACY 更新炉の概要について、第3章では給排水系の要求性能に 対するモックアップ試験の方法及び結果について、第4章では本試験で得られた成果を基 に総括し、STACY 更新炉給排水系の成立性について報告する。

2. STACY 更新炉の概要

本章では、STACY 更新炉の水位制御に関する主要設備(第 2.1 節)及び STACY 更新 炉の運転の流れ(第 2.2 節)について述べる。

2.1 STACY 更新炉の水位制御に関する主要設備

STACY 更新炉は、炉心タンク、給排水系、安全板装置、プロセス計装設備等から 構成される。STACY 更新炉の概略系統図を図 2.1-1 に、鳥瞰図を図 2.1-2 に、STACY 更新炉の主な機器の仕様を表 2.1-1 に示す。

以下では、主要設備のうちの水位制御に関連する炉心タンク、給排水系及びプロ セス計装設備の仕様について示す。

2.1.1 炉心タンク

STACY 更新炉の炉心タンクは、内径約 180 cm、高さ約 190 cm の円筒形状の開放 容器である。炉心タンク内部には、棒状燃料、減速材、反射材(軽水)等で形成さ れる炉心を構成する。棒状燃料は、外径約 9.5 mm、長さ約 150 cm のジルコニウム合 金製の筒状被覆管に二酸化ウランペレットを充填した燃料棒である。この棒状燃料 は、格子板により支持され、所定の格子間隔をもって配列される。格子板は、炉心 タンク内の定盤及び格子板フレームによって固定される。軽水は、脱塩水(電気伝 導度の低い水)や実験計画に応じ可溶性中性子吸収材を添加したものであり、炉心 タンクが設置されている炉室(S)の直下(高低差約 10 m)に位置する炉下室(S) に設置されたダンプ槽に貯留し、遠心ポンプによって炉心タンクに給水する。 STACY 更新炉では、格子板の格子間隔(正方格子状で 1.09~2.55 cm)を変更し、減 速材対燃料ペレット体積比を変えることで炉心核特性を変化させることが可能であ り、炉心タンクの水位調整により炉心の反応度を制御する。炉心タンクの概略図を 図 2.1-3 に示す。

2.1.2 給排水系

給排水系は給水系及び排水系並びにダンプ槽で構成され、その配管は炉心タンク の底面で接続されている。

給水系には高速給水系(最大給水流量 380 ℓ/min)と低速給水系(最大給水流量 150 ℓ/min)があり、それぞれの系統に給水ポンプ、給水吐出弁、流量調整弁、給水 バイパス弁等を備え、ダンプ槽に貯留した軽水を反応度に応じた流量で炉心タンク に給水できる性能を持つ。給水に当たっては、事前解析等により推定された予想臨 界水位の4分の3以下は高速給水系を、それを超える水位では反応度添加率を1sあ たり3 セント(¢)以下に制限するため低速給水系を用いる。

排水系は、急速排水弁2基、通常排水弁1基等を備える系統である。急速排水弁 又は通常排水弁を開とすることで炉心タンクからダンプ槽に自重排水し、炉心に負 の反応度を添加する。急速排水弁は、動力源や制御信号が断たれた場合にスプリン グ反力により自動開となるフェイルセーフ機構で、原子炉を緊急停止させるスクラ ム信号を受信すると1s以内に開となり、原子炉を速やかに停止に導く。

ダンプ槽は、軽水を貯留するためのタンクであり、約6m³の容積を持っている。

2.1.3 プロセス計装

プロセス計装とは、原子炉運転時のプロセスデータ(炉心タンク水位、炉心水温、 給水流量等)を計測する機器のことであり、そのうち給排水系の水位制御に関する 機器には、給水停止スイッチ、排水開始スイッチ、最大給水制限スイッチ及びサー ボ型水位計がある。

給水停止スイッチは、給水系から炉心タンクへの供給量を制限するための装置で ある。給水停止スイッチは、炉心タンク内を上下する駆動軸、駆動軸を上下させる ためのネジ軸、ネジ軸を回転させるための電動機、炉心タンク水面を検知するフロ ートスイッチ等で構成される。フロートスイッチは、駆動軸の先端に装備されてい る。給水停止スイッチによる供給量の制限は、あらかじめ目標とする水位の高さに 水面検知器を設定し、水面が目標水位に達した際に発信される給水停止信号により 給水吐出弁及び流量調整弁が閉止することによって行われる。給水停止スイッチの 概略図を図 2.1-4 に示す。

排水開始スイッチは、給水停止スイッチと同じ駆動軸の先端に設置され、その水 面検知器(フロートスイッチ)は給水停止スイッチのそれより7mm上方に位置して いる。排水開始スイッチは、給水停止スイッチの故障や地震等によって水面が給水 停止スイッチの水面検知位置より上昇した場合に、排水開始信号(排水弁開及び給 水停止)により炉心タンクから排水(反応度除去)させる機能を備えている。

最大給水制限スイッチは、給水停止スイッチ及び排水開始スイッチの故障により 給水が停止しない事象を想定し、いかなる場合でも反応度が最大過剰反応度 80 ¢を 超えないように水位上昇を制限するための装置である。また、その駆動及び水面検 知の機構は、給水停止スイッチと同様である。最大給水制限スイッチが作動した場 合には、スクラム信号が発信され、原子炉の緊急停止動作(給水停止及び排水開始、 安全板の炉心挿入)が行われる。

サーボ型水位計は、炉心タンクと連通する垂直導水管内のフロートを追従監視す る機構を備えた水位計で、炉心タンクに供給される水位の連続監視及び給水停止後 の静止水面の高さ計測を行う。

表 2.1-1 STACY 更新炉の主要仕様

炉心	燃料体	棒状燃料				
		外径 約 9.5 mm、長さ 約 150 cm(燃料有効長 約 145 cm)、				
		ウラン重量約 0.8 kgU/本				
		²³⁵ U 濃縮度 10 wt%以下				
		最大挿入本数 50 本以上 900 本以下				
	炉心タンク	材質 ステンレス鋼				
		形状 縦型円筒形				
		内径 約 180 cm、高さ 約 190 cm				
		炉心構成範囲 40 cm 以上 140 cm 以下※				
	格子板及び	材質 ステンレス鋼、アルミニウム合金又はジルコニウム合金				
	格子板フレーム	格子板 上、中、下(3段組)				
給排水系	給水系	最大給水流量:高速給水系:380 ℓ/min 以下				
		低速給水系:150 ℓ/min 以下				
		給水吐出弁、流量調整弁:スプリング反力駆動型				
		(スクラム信号発生後1s以内に作動)				
		急速排水弁:スプリング反力駆動型				
	排水系	(スクラム信号発生後1s以内に作動)				
		通常排水弁:スプリング反力駆動型				
	ダンプ槽	材質 ステンレス鋼				
		容量 約6m ³				
安全板	安全板	材質 ステンレス鋼又はアルミニウム合金				
装置	駆動装置	駆動ストローク約150 cm				
	安全板	材質 被覆材 ステンレス鋼				
		充填材 カドミウム				
		寸法 幅 20 cm 以上 又は 約 10 cm、長さ 約 150 cm				
プロセス	給水停止スイッチ	水面検知器 フロートスイッチ				
計装	(排水開始スイッジ	チ) 設定範囲: 0~1400 mm※				
	最大給水停止ス	イッチ 水面検知器 フロートスイッチ				
		最大設定位置: 1450 mm※				
	サーボ型水位計	計測範囲: -100~1500 mm※				

※ 棒状燃料有効長(ミート部)下端をゼロとする。



図 2.1-1 STACY 更新炉の概略系統図



図 2.1-2 STACY 更新炉の鳥瞰図



図 2.1-4 給水停止スイッチの概略図

2.2 STACY 更新炉の運転の流れ

STACY 更新炉は、第 2.1 項で説明したとおり、炉心タンクの水位調整により反応 度制御を行う原子炉である。この運転手順は以下のとおりである。

原子炉の起動

炉心タンクへの給水前に、給水停止スイッチを無限平板体系の最小推定臨界下 限値(棒状燃料有効長下端を水位0mmとして水位40mm)の位置に設定する。次 に、原子炉の緊急停止に備え、安全板を炉心タンク上部に引き上げ、挿入待機さ せる。その後、給水流量の確認のため、バイパスライン(給水バイパス弁開)及 び排水ライン(急速排水弁及び通常排水弁(以下「排水弁」という。)開)を形成 し、給水ポンプ起動による循環運転を行う。最後に、排水ラインを閉じ、炉心タ ンクへ給水する。

② 炉心タンクへの段階的給水による臨界近接

炉心タンク水位が設定した給水停止スイッチの位置に到達すると、給水停止信 号により給水が停止する。このとき、給水ポンプは停止せず、バイパスラインに よる循環運転となる。その後、中性子逆増倍率の測定により臨界水位を予想し、 次の設定水位まで給水停止スイッチを上昇させる。次に、再び給水吐出弁及び流 量調整弁を開として炉心タンクに給水する。予想臨界水位の4分の3までは高速給 水系を、それ以降は低速給水系を用いて給水する。

このように、段階的給水による臨界近接を行い、原子炉を臨界状態に到達させる。臨界到達後、サーボ型水位計による水位計測等、必要な計測を行う。

炉心タンクへの段階的給水手順の概要を図 2.2-1 に示す。

③ 原子炉の通常停止

原子炉を停止するときは、排水弁を開とし、炉心タンクからダンプ槽に排水さ せる。全量が排水されたことを確認した後、安全板を炉心タンク内に挿入すると ともに、中性子出力が正常に低下したことを確認し、運転終了とする。

④ 原子炉の緊急停止

地震による水面揺動、給水停止スイッチの故障等により炉心タンク水位が異常 に上昇した場合には、まず、排水開始スイッチに到達し、排水開始となる。万一、 排水開始スイッチが作動しなかった場合には、手動スクラム、最大給水制限スイ ッチ等のスクラム信号により原子炉は緊急停止する。



図 2.2-1 炉心タンクへの段階的給水手順の概要

3. 給排水系モックアップ試験

本章では、STACY 更新炉における給排水システムの成立性を確認するために実施 した、給排水系モックアップ試験の方法と結果について述べる。給排水システムに は、水位変化に伴う反応度を制御するための性能として「給水流量制限」、「給水流 量調整」、「給水停止時間」、「排水能力」、「速やかな排水」といった性能が求められ る。

以下では、給排水システムに求められる性能(第 3.1 節)、及びその要求を確認す るために製作したモックアップ試験装置設計の概要(第 3.2 節)について示す。次に、 そのモックアップ試験の結果(第 3.3 節)について述べる。

3.1 給排水システムの要求性能

給排水システムは、STACY 更新炉の安全運転の観点から以下の仕様としている。

- 炉心タンクへの給水流量は、高速給水系 380 ℓ/min 以下、低速給水系 150 ℓ/min 以下に制限できること(給水流量制限)。
- 2) 炉心タンクへの給水流量は、高速給水系 0~380 ℓ/min、低速給水系 0~150 ℓ/min の範囲で調整可能であること(給水流量調整)。
- 3) 給水吐出弁及び流量調整弁の閉止時間は、スクラム信号発生後、1 s 以内である こと(給水停止時間)。
- 4) 急速排水弁による排水能力は、給水能力を上回ること(排水能力)。
- 5) 急速排水弁の開時間は、スクラム信号発生後、1 s 以内であること(速やかな排水)。

3.2 試験装置の概要

給排水系モックアップ試験装置は、主な機器として、炉心タンク及び給排水系 (給水ポンプ、給水吐出弁、流量調整弁、排水弁及びダンプ槽)で構成される。また、 給排水システムの性能確認のため、給水流量計及び水位計といった計測機器を備え るとともに、実機規模及び実機相当性能となるよう設計製作している。

以下に、主な機器の設計方針及び主要仕様を、給排水系モックアップ試験装置の 外観図及び概略系統図を図 3.2-1、3.2-2 に示す。

- (1) 炉心タンク
 - a. 設計方針
 - ① 実機規模の試験とするため、炉心タンクは、内径約 180 cm の円筒形状タンクとした。高さ寸法は、給排水系モックアップ試験装置の設置場所の空間的制約から、実機約 190 cm に対し、約 120 cm とした。実機規模の試験に当たっては、水面変位(波立ち)は低水位の方が大きくなること、高水位での評価は試験データの外挿が可能であることから、高さ寸法が実機より低くても最終的な結果に影響することはないと判断した。
 - ② 炉心タンク内部には、実機同様、炉心タンク底から約 20 cm の高さに定盤を 設置し、その定盤の上に格子板フレーム及び格子板を設置した。定盤は、実機 の炉心における下部の反射体領域を確保するために設置する。また、定盤は、 炉心タンク底面からの給水時の水面の波立ちを抑える効果がある。

炉心タンクの縁には台座を設け、モックアップ試験用の水位計を取り付けら れる構造とした。

- b. 主要仕様
 - ① 炉心タンク(図 3.2-3 参照)
 - ・材 質 : SUS304
 - ・寸法: : 内径約180 cm、高さ約120 cm
 - ・容量:約2.5 m³
 - ② 定盤(図 3.2-4 参照)
 - ・材 質 : SUS304
 - ・寸 法 : 直径 約160 cm、厚さ 約2 cm
 - ・設置高さ:約20cm(炉心タンク底を基準)
 - ③ 格子板フレーム及び格子板(図 3.2-4 参照)
 - ・材 質 : SUS304
 - ・寸 法 :縦約120 cm、横約140 cm
 - ・各格子板の設置高さ:下段約20cm、中段約50cm、上段約95cm
 (炉心タンク底を基準)

(2) 給排水系

- a. 設計方針
 - ① 炉心タンクとダンプ槽との設置位置の高低差を実機相当とするため、約 10 m とした。
 - ② 給水系には、高速給水系及び低速給水系を設け、それぞれの系統に設置する 弁の配置順及び配管径についても実機同等とした。
 - ③ 給水系の配管長は、実機の使用範囲(低速給水系:150 ℓ/min以下、高速給水 系:380 ℓ/min以下)を超えた流量の確保のため、配管抵抗が小さくなるよう実 機より短く設計した。これにより、給水流量が大きくなり、流量調整が厳しく なる。

- ④ 高速給水系及び低速給水系のポンプは、実機と同等性能のものとした。
- ⑤ 排水系は、実機と同等の弁及び配管径とした。
- ⑥ 排水系の配管長は、設置場所の空間的制約から、実機より半分程度に短くなった。配管長が短くなると配管抵抗が小さくなるため、排水流量が大きくなることで排水性能を過大評価する可能性がある。このため、配管抵抗を変化できるようオリフィスを挿入できる構造とした。使用するオリフィスの内径は、約65 mm (JIS 規格 65A 配管相当)とし、配管抵抗を十分な範囲で模擬できるよう考慮した(実機配管内径約 80 mm (呼び径 JIS 規格 80A))。
- b. 主要仕様
 - ① 給水系
 - <高速給水系>
 - ・高速給水ポンプ:
 - 型 式:遠心ポンプ
 - 定格容量:450 ℓ/min(揚程:50 m)、基数:1基
 - ・主要配管径:JIS 規格 50A
 - ·高速給水吐出弁 1基
 - ・高速流量調整弁、高速給水バイパス弁 各1基
 - (図 3.2-5 参照)
 - <低速給水系>
 - ・低速給水ポンプ:
 型 式:遠心ポンプ
 定格容量:175 ℓ/min(揚程:50 m)、基数:1基
 - 足俗谷里.1/3 (/mm (16) 任.30 m)、 苯氨.
 - ・主要配管径:JIS 規格 40A
 - ·低速給水吐出弁 1基
 - ・低速流量調整弁、低速給水バイパス弁 各1基
 (図 3.2-5 参照)
 - ② 排水系
 - ・急速排水弁:配管径 JIS 規格 80A、基数:2基
 - ・通常排水弁:配管径 JIS 規格 25A、基数:1基
 - ③ ダンプ槽(図 3.2-6 参照)
 - ・材 質:SUS304
 - ・寸 法:外径約 150 cm 高さ約 340 cm
 - 容量:約5m³



図 3.2-1 給排水系モックアップ試験装置の外観



図 3.2-2 給排水系モックアップ試験装置の概略系統図









3.3. 試験結果

3.3.1 給水ポンプ性能試験

(1) 試験目的

STACY 更新炉の給水系に採用するポンプについて、実機相当の給水方式及び配 管系統における流量特性を確認する。

(2) 背景

(給水ポンプの型式選定理由)

炉心タンクへの通常運転における最大給水量は約4m³であり、この給水量に対 し円滑な実験運転を実現するため、吐出量が大きい遠心ポンプ型を採用する。遠 心ポンプは、インペラ(羽根車)の回転による遠心力を水に与えることで揚水す る方式である。この方式における最大給水流量として高速給水系 380 ℓ/min、低速 給水系 150 ℓ/min を設定している。

(更新炉の給水方式)

吐出量が大きい遠心ポンプを採用するに当たり、給水系にはダンプ槽との循環 系となるバイパスラインを設ける。これは、炉心タンクへの安定給水及び迅速給 水開始に必要なポンプの連続運転のため、また、迅速給水停止時のウォーターハ ンマー防止対策のためのものである。炉心タンクへの給水は、このバイパスライ ンを用いた循環とともに行う。このため、給水ポンプは、炉心タンクへの給水流 量にバイパスラインの循環流量を加えた吐出量が必要となる。この理由から、高 速給水ポンプ及び低速給水ポンプそれぞれの定格容量は、バイパスライン循環流 量を遠心ポンプの連続運転中に必要な最低流量(高速給水ポンプ:70 ℓ/min、低速 給水ポンプ:25 ℓ/min)とし、これに炉心タンクへの最大給水流量(高速給水系: 380 ℓ/min、低速給水系:150 ℓ/min)を加えた容量として 450 ℓ/min、175 ℓ/min に設 定している。

(遠心ポンプの流量特性)

遠心ポンプの定格容量とは、設定した揚程(H)に対する流量を意味しており、 遠心ポンプは、揚程が上がれば定格容量で示す流量より小さくなる(その逆も然 り。)という流量特性を有している。ここで言う揚程とは、ポンプが水を持ち上げ る高さのことであり、STACY 更新炉の給水ポンプの揚程は50mで設定している。 この 50mの設定揚程に対し、給水系の揚程は、ダンプ槽の水面から炉心タンクま での高低差約10mと配管や弁の配管抵抗(摩擦損失水頭)20~30mを合計した約 40mを想定している。給水ポンプの揚程を給水系の想定揚程より高く設定するこ とで、炉心タンクへの給水の際にバイパスラインによる循環を行った場合でも、 給水系の流量が確保できる設計としている。

これらの実機設計の妥当性について、実機同等の配管系統及び給水方式の試験 装置を用いて確認する。

遠心ポンプの構造説明図を図 3.3.1-1 に、性能曲線を図 3.3.1-2 に示す。

(3) 試験方法

高速給水系又は低速給水系の各弁を以下の条件とし、この条件における給水流量 を計測する。また、炉心タンクの水位上昇(揚程変化)に伴う流量変化を計測する。 ①高速給水系又は低速給水系の各弁の条件

・流量調整弁:開、給水吐出弁:開、給水バイパス弁:開又は閉 ②流量計測ポイント

・ 炉心タンク水位: 0^{**}~1000 mm (200 mm step)

※ 炉心タンク底面を基準

(4) 試験結果

高速給水系の計測結果を図 3.3.1-3 に、低速給水系の計測結果を図 3.3.1-4 に示す。

流量調整弁、給水吐出弁及び給水バイパス弁を開とし、排水弁が開の場合(炉心 タンク水位 0 mm)の給水流量は、高速給水系で約 375 ℓ/min、低速給水系で約 80 ℓ/min であった。この状態から、排水弁を閉とし、炉心タンク水位 200~1000 mm までの給水流量の範囲は、高速給水系で約 300~315 ℓ/min、低速給水系で約 30~ 40 ℓ/min であった。

また、給水バイパス弁を閉とし、バイパスライン循環をなくした状態での給水流 量は、高速給水系で約 560~575 ℓ/min、低速給水系で約 220~225 ℓ/min であった。

この結果から、バイパスライン循環かつ炉心タンクに給水しない状態(排水弁開) から、炉心タンク給水状態(排水弁閉)とした場合には、給水流量は約 50 ℓ/min 程 度低下することが分かった。また、バイパスラインを閉止した場合には、それぞれ の給水系の流量は大きくなるため、バイパスラインの循環流量調整により、高速給 水系約 315~570 ℓ/min、低速給水系約 40~220 ℓ/min の範囲で給水流量を変化させる ことが可能であることが分かった。

以上から、選定した遠心ポンプは、STACY 更新炉の高速給水系及び低速給水系に おける炉心タンクへの給水流量(高速 380 ℓ/min、低速 150 ℓ/min)を確保できること を確認した。ただし、遠心ポンプの特性上、バイパスラインの循環流量の調整次第 で高速給水系及び低速給水系で定める最大給水流量を超える場合がある。このため、 あらかじめインバータ(流量制御機構)や手動弁により適切な流量制限を行う必要 がある。第 3.3.2 節では、高速給水系及び低速給水系における給水流量制限のため、 最大流量の設定方法(初期設定作業手順)を決定する試験を行う。



図 3.3.1-1 遠心ポンプ構造説明図



図 3.3.1-2 給水ポンプ性能曲線



図 3.3.1-3 高速給水系の給水流量



図 3.3.1-4 低速給水系の給水流量

3.3.2 最大流量の設定(初期設定)

(1) 試験目的

高速給水系、低速給水系のそれぞれで定める最大給水流量が制限できることを確認する。また、この最大給水流量は、STACY 更新炉の使用前検査や実験計画時の初期設定となるため、その作業手順を決定する。

(2) 背景

第 3.3.1 節で述べたとおり、遠心ポンプは、揚程により流量が変化する特性があり、 バイパスライン循環流量の調整次第で高速給水系及び低速給水系のそれぞれの最大 給水流量を超える場合がある。水位制御においては、最大流量を適切に制限する必 要があるため、流量制限方法の選定が必要である。

STACY 更新炉の通常運転時の最大給水流量(制限値)は、高速給水系 380 ℓ/min、 低速給水系 150 ℓ/min である。また、これに加え、単一故障を想定した場合の給水流 量制限値として低速給水系の 175 ℓ/min がある。このうち後者は、炉心タンクへの給 水中にバイパスラインが閉塞(給水バイパス弁の故障)し、バイパスラインの循環 流量が炉心タンクへの給水に加わった場合の流量として設定したものであり、第 3.3.1 節で述べたとおり、この流量を定格容量としている。なお、高速給水系は、そ の使用範囲が予想臨界水位の 4 分の 3 以下となる未臨界状態での給水のみに使用す るものであり、単一故障想定時でも反応度添加に至ることはない。このため、バイ パスライン閉塞時の流量制限は必要ないが、定格容量設定の考え方から、低速給水 系と同様に流量制限を行う。

また、前述のとおり、バイパスラインの流量調整次第で給水流量が変化する。こ れは、バイパスラインの流路を開く(流量を多くする。)方向においても同様である。 このため、給水バイパス弁の開度に応じた給水流量の変化を把握する。

(3) 試験方法

排水弁を開、給水バイパス弁を閉、流量調整弁及び給水吐出弁を開とし、給水ポ ンプを起動する。この状態から、給水ポンプの定格容量(高速給水系 450 ℓ/min、低 速給水系 175 ℓ/min)となるよう、ポンプのインバータを調整(実機では手動弁の開 度操作)する。次に、給水バイパス弁を徐々に開とし、各給水系の最大流量(高速 給水系 380 ℓ/min、低速給水系 150 ℓ/min)に調整する。次に排水弁を閉とし、炉心タ ンクに給水するとともに、炉心タンク内の水位上昇に応じた流量の変化を計測する。

また、給水バイパス弁の開度を段階的に開いた状態での給水流量を計測する。給水バイパス弁の各々の開度は、高速給水系は排水弁を開とした場合の給水流量が380 及び320 ℓ/minの開度並びに全開とし、低速給水系は排水弁を開とした場合の給水流量が150、100 及び75 ℓ/minの開度並びに全開とする。

(4) 試験結果

高速給水系の計測結果を図 3.3.2-1 に、低速給水系の計測結果を図 3.3.2-2 に示す。 高速給水系及び低速給水系のそれぞれで設定した最大給水流量(高速給水系: 380 ℓ/min、低速給水系:150 ℓ/min)及び単一故障想定時(給水バイパス弁の閉塞 時:開度0%)の流量(高速給水系:450 ℓ/min、低速給水系:175 ℓ/min)は、炉心タ ンク内の水位が上昇するにつれて下がる方向となるため、適切に制限できることを 確認した。

また、給水バイパス弁の開度調整により、高速給水系は約260~450 ℓ/min、低速給 水系は約70~175ℓ/minの範囲で給水流量が変化することから、給水バイパス弁の開 度調整だけでも給水流量の制限が可能であることを確認した。

さらに、排水弁の開状態(炉心タンク水位 0 mm)から炉心タンクへの給水(排水 弁の閉)に切り替えた場合、高速給水系で約 40~60 ℓ/min、低速給水系で約 2~ 30 ℓ/min の範囲で流量が変化することを確認した。この変化は、給水バイパス弁の開 度を広げるほど大きくなる。これは、給水高さ(炉心タンク水位に伴う揚程の変化) によるものであり、流量設定時には、この変化量を考慮した上で設定する必要があ るということを示している。ただし、配管や弁の敷設状況(配管長や曲げ等に伴う 配管抵抗)によって変動するため、実機でも同様の試験を行うことでその変化量を 把握する必要がある。

本試験により得られた給水流量の設定方法を基に、実機の初期設定手順を決定した。図 3.3.2-3 にこの手順を示す。



図 3.3.2-1 高速給水系 初期流量設定試験結果



図 3.3.2-2 低速給水系 初期流量設定試験結果



図 3.3.2-3 給水流量設定手順(1/2)



図 3.3.2-3 給水流量設定手順(2/2)

3.3.3 給水流量調整性能

(1) 試験目的

高速流量調整弁又は低速流量調整弁を用いて、給水流量を高速給水系は 0~380 ℓ/min の範囲、低速給水系は 0~150 ℓ/min の範囲で調整できることを確認する。

(2) 背景

STACY 更新炉の通常運転時の給水流量制限値は、第3.3.2節で述べたとおりである が、この給水流量は、水位上昇速度制限に由来するものであり、反応度添加率(炉 心に添加する1sあたりの反応度)を考慮しない場合の制限値である。臨界近傍での 給水時の最大反応度添加率は3¢/sであり、給水流量はこの添加率以下になるよう調 整しなければならない。

STACY 更新炉の炉心は、第2.1.1節で述べたとおり、格子板に配列する棒状燃料、 減速材、反射材(軽水)等で形成し、棒状燃料の数量や配列間隔、軽水の状態(軽 水の温度や可溶性毒物の濃度)によって炉心の核特性の変化とともに臨界水位が変 わる。この臨界水位に応じて水位反応度(水位1mmあたりの反応度)が決定され、 臨界水位が低いほど水位反応度は大きくなる。構築可能な炉心の最低臨界水位は 400 mm であり、この臨界水位における水位反応度が最も大きく約6¢/mmとなる。 最大反応度添加率は3¢/sであるため、水位上昇速度を0.5 mm/s以下とする給水流量 の調整が必要となる。

高速給水系及び低速給水系の最大給水流量に対する水位上昇速度は、それぞれ 2.5 mm/s、1.0 mm/s である。高速給水系は、未臨界状態でのみ使用する系統であるた め、繊細な流量調整は特段不要である。しかし、低速給水系は、臨界近傍で使用す る系統であり、その給水能力(水位上昇速度 1.0 mm/s)から、最大応度添加率以下 に制限するため、水位反応度が 3 ¢/mm を超える炉心においては適切な流量調整(水 位上昇速度調整)が必要である。また、前述のとおり、最大水位反応度(6 ¢/mm) となる炉心に対する水位上昇速度は 0.5 mm/s であり、この場合の給水流量は 75 ℓ/min となることから、75 ℓ/min 以下に調整できる性能が求められる。

(3) 試験方法

高速給水系及び低速給水系を第 3.3.2 節で示した手順を用いて設定した状態(初期 設定)とし、炉心タンクに給水する。このとき、流量調整弁の弁開度を 10 %毎に変 化させ、弁開度毎の流量を計測する。また、同一開度での流量の変化量を把握する ため、開方向(10~100%)及び閉方向(100~10%)で流量を計測し、その変化幅 を確認する。さらに、給水流量は揚程によって変化するため、水位(0(排水弁開状 態)、200、600及び 1000 mm)毎に計測する。

また、炉心タンクへの給水流量は、給水バイパス弁の開度によっても変化する。 このため、給水バイパス弁の開度をパラメータにして流量計測を行う。

(4) 試験結果

高速流量調整弁及び低速流量調整弁による流量調整性能の結果を、それぞれ図 3.3.3-1 及び図 3.3.3-2 に示す。

(調整可能流量)

流量調整弁で調整可能な最低流量は、高速給水系及び低速流量系ともに 15 ℓ/min 程度であった。これは、最大水位反応度となる炉心(臨界水位 400 mm)における 流量制限値 75 ℓ/min に対し、その 1/5 となる流量まで調整できることを示してい る。高速給水系には繊細な流量調整は不要であるが、高速給水系の流量調整弁に おいても幅広い調整が可能であることを確認した。

給水バイパス弁の開度をパラメータとし、流量調整弁の開度を変化させた場合 の流量計測においては、図 3.3.3-2 で示すとおり、給水バイバス弁の開度を大きく した方が流量調整弁の開度に伴う流量変化が緩やかになることを確認した。この ことから、給水バイパス弁の弁開度を大きくすることで、より繊細な流量調整が 可能となることを確認した。また、図 3.3.3-2(2)~(4)に示すとおり、低速給水系の 給水バイパス弁の開度を 55%とした場合には、流量調整弁を全開(100%開)のと きでも給水流量は 40 ℓ/min 程度に制限され、前述した最大水位反応度の炉心の場 合の制限流量 75 ℓ/min に達しないことを確認した。このことから、流量調整弁の 開度調整に依存せず、給水バイパス弁の開度調整のみで最大給水流量の制限が可 能であるという結果も得られた。

(流量調整弁の開度による流量変化)

高速給水系及び低速給水系ともに、流量調整弁の開度 60%以下の範囲では開度 と給水流量の関係が線形的に推移し、開度 60%を超える範囲では変化が小さいこ とを確認した。このことから、運転中に給水流量を大きく変化させる場合には、 開度 60%以下の範囲が適しているという結果が得られた。

また、同一弁開度における給水流量の比較においては、高速給水系で最大 18 ℓ/min、低速給水系で最大 7 ℓ/min の変化幅があり、この変化量は最大給水流量 に対して約5%となることを確認した。このことから、流量調整する際の同一弁開 度における変化幅として、最大給水流量の5%を考慮すればよいという結果が得ら れた。



図 3.3.3-1 高速流量調整弁の流量調整性能(1/2)



(3) 高速給水系 炉心タンク水位 600 mm



図 3.3.3-1 高速流量調整弁の流量調整性能(2/2)



(1) 低速給水系 炉心タンク水位 0 mm (排水弁開)



(2) 低速給水系 炉心タンク水位 200 mm図 3.3.3-2 低速流量調整弁の流量調整性能(1/2)



(3) 低速給水系 炉心タンク水位 600 mm



(4) 低速給水系 炉心タンク水位 1000 mm図 3.3.3-2 低速流量調整弁の流量調整性能(2/2)

3.3.4 給水停止時間測定

(1) 試験目的

給水吐出弁及び流量調整弁がスクラム等の信号発生から1s以内に開から閉となる ことを確認する。

(2) 背景

STACY 更新炉の反応度制御の機構上、給水停止信号が発信されても、給水が完全 に停止するまでの間は水位上昇により反応度が添加される。このため、スクラム信 号や給水停止信号発生から給水停止までの時間は短い方が望ましく、給水吐出弁及 び流量調整弁の動作時間として1s以内に設定している。

給水吐出弁及び流量調整弁の駆動には圧縮空気とスプリング反力を用いている。 初期状態(閉)から作動状態(開)への駆動には圧縮空気を使用し、初期状態に戻 る際はスプリング反力を用いる。後者は、電源が喪失した場合でもその機能は失わ ないフェイルセーフ機構である。

これらのことから、高速給水系及び低速給水系の給水吐出弁及び流量調整弁の閉 止時間を計測し、スプリング反力での作動時間が1s以内となることを確認する。

また、第 3.3.1 節で述べたとおり、給水の迅速停止によるウォーターハンマー(異常圧力)発生防止のため、給水系にはバイパスラインを設けている。給水停止時の 発生圧力が異常(弁体部の耐圧試験圧力(1 MPa)以上)とならないことを確認する。

(3) 試験方法

高速給水系及び低速給水系の給水吐出弁又は流量調整弁に閉止信号を入力し、閉 止信号発信から閉止リミット作動までの時間を計測する。また、給水停止時の発生 圧力を計測する。

(4) 試験結果

高速給水系、低速給水系のそれぞれの給水吐出弁及び流量調整弁の閉止時間は、 1 s 以内にできる見通しがあることを確認した。試験結果を表 3.3.4-1 に示す。

ただし、流量調整弁については一部改造を行う必要があること、また高速給水系 についてはウォーターハンマーによる圧力抑制の考慮が必要であることを確認した。 確認結果及び対策を以下に示す。

(流量調整弁の閉止時間)

流量調整弁の閉止時間は、1sを大幅に超える結果(高速流量調整弁:約9s、低速 流量調整弁:約5s)となった。これは、弁の仕様として、弁開度調整機構のポジシ ョナーが、開度制御だけでなく閉止状態へ移行する際も動作することによるもので あった。STACY 更新炉の実機では、閉止動作時の開度制御は不要である。このため、 閉止時は、弁本体に供給した圧縮空気を、ポジショナーを介さず三方弁を用いて外 部へ直接排気させるとともに、流量調整弁内部のスプリング反力により閉止する機 構に改造した。これにより、低速給水系、高速給水系それぞれの流量調整弁も閉止 時間を約 0.65 s まで短縮できることを確認した。改造した流量調整弁の概要を図 3.3.4-1 に示す。

(ウォーターハンマーの考慮)

給水系には、ウォーターハンマー発生防止のため、給水吐出弁及び流量調整弁の 上流側(ポンプ側)にバイパスラインを設けている。これにより、弁を閉止した際 の圧力はバイパスラインへ逃げることになるため、有意な圧力上昇は見られなかっ た。しかし、元々の設計で考慮していなかった弁の下流側において、低速給水系及 び高速給水系の双方でウォーターハンマーによる圧力上昇を確認した。

この弁の下流側で発生するウォーターハンマーは、水柱分離現象とも呼ばれてい るものであった。本現象の発生原理は、まず、管内の流れが急激に停止すると、水 は慣性力と重力の作用によって流れ続けようとするが、後からの水の供給がないた め、停止箇所(弁)の直後で圧力が低下する。次に、この圧力が飽和水蒸気圧まで 下がった場合、水が蒸発するとともに分離する。その後、分離した水が再結合する 際に衝撃圧が生じるというものである。この圧力は、配管内の流速が早く、停止時 間が短いほど大きくなる。低速給水系においては、流量が小さいため、圧力の発生 は約 0.6 MPa となり、弁体部の耐圧(試験圧力:1.0 MPa)に至ることはなかった。 しかし、高速給水系においては、同系統の最大流量及び弁の閉止時間を 0.85 s とした 場合、弁体部の耐圧を超える圧力が発生(約 1.3 MPa)することを確認した。

ウォーターハンマーの抑制には、流量を抑えることや緩やかに停止させることが 挙げられる。流量については、高速給水系の最大流量 380 ℓ/min に対し、300 ℓ/min と した場合、発生圧力は約 0.7 MPa まで低減されることを確認した。また、緩やかな停 止については、高速給水系の最大流量はそのままに、0.85 s であった弁の閉止時間を 1 s に調整したところ、発生圧力は約 0.5 MPa まで低減されることを確認した。

さらに、この発生圧力は、揚程が高くなることでも小さくなることを確認した。 排水系による循環時は揚程が約7mであるが、排水弁を閉じ、炉心タンクへの給水 に切り替えると揚程は約10mと高くなる。この炉心タンク給水時の発生圧力は、閉 止時間0.85 s及び流量380 ℓ/minの場合でも、約0.5 MPaであった。揚程が高くなっ た場合に発生圧力が小さくなる理由は、上述したとおり、本現象が水の慣性力と重 力の作用によって分離することで発生するものであり、弁の下流側の抵抗(揚程) が大きくなると慣性力が抑制されるためである。これにより、揚程10m及び、閉止 時間1sの場合には流量変化に伴う圧力上昇は見られなかった。

以上のことから、給水流量を抑えることや閉止時間を調整することにより、高速 給水系においてもウォーターハンマーによる発生圧力を弁体部の耐圧以下に制限で きるという結果が得られた。

ウォーターハンマー測定時の系統概要を図 3.3.4-2 に、試験結果を図 3.3.4-3 及び図 3.3.4-4 に、ウォーターハンマーの代表波形を図 3.3.4-5 に示す。

なお、第 3.2 節(2)で述べたように、本モックアップ試験装置の給水系配管は、 STACY 更新炉実機の給水系よりも配管抵抗が小さくなるよう設計している。したが って、本試験で確認した圧力は、実機のものより大きいことは明らかであるため、 保守的な評価である。 表 3.3.4-1 給水吐出弁及び流量調整弁の閉止時間

測定	高速給水系		測定	低速給水系		
回数	給水吐出弁 (s)	流量調整弁 (s)	回数	給水吐出弁 (s)	流量調整弁 (s)	
1	0.83	0.65	1	0.65	0.62	
2	0.84	0.63	2	0.65	0.60	
3	0.85	0.63	3	0.64	0.66	



図 3.3.4-1 流量調整弁改造概要図



図 3.3.4-2 ウォーターハンマー測定時の系統概要



図 3.3.4-3 高速給水系のウォーターハンマー試験結果



図 3.3.4-4 低速給水系のウォーターハンマー試験結果



(2) 高速給水系:流量約 400 ℓ/min、揚程約 7 m、閉止時間約 0.85 s

図 3.3.4-5 ウォーターハンマーの代表波形 (1/2)



(4) 高速給水系:流量約380 ℓ/min、揚程約7m、閉止時間約1.0s

図 3.3.4-5 ウォーターハンマーの代表波形 (2/2)

3.3.5 最大給水時の排水性能試験

(1) 試験目的

給水停止中はもちろんのこと、給水停止不可となった場合でも、並列で2基ある 急速排水弁のうち片方が開であれば炉心タンクに給水されることはない(排水性能 は給水性能を上回る)ことを確認する。

(2) 背景

炉心タンクに供給した軽水は、排水系に設置した急速排水弁又は通常排水弁を通 じてダンプ槽に排水する。このうち、急速排水弁は、スクラム信号により急速排水 を行うための弁である。この急速排水弁の排水性能は、スクラム時(給水停止)の 急速排水はもちろんのこと、給水系に異常(給水停止不可)があった場合でも、確 実に排水できることが求められる。また、急速排水弁は、多重性が求められる弁で あるため2系統(同型2基)を有し、万一、一方の急速排水弁の排水性能が失われ た場合でも、他方により、排水性能が失われないよう設計しなければならない。

(3) 試験方法

高速給水系の最大給水流量を超える流量(約 400 ℓ/min)で炉心タンクへ給水し、 水位が 950 mm となった時点で急速排水弁1基(A系又はB系)を開とする。その後 も給水を継続させたとしても、給水中に炉心タンク水位が上昇せず、排水されるこ とを確認する。また、この計測は、炉心タンク水位が 250 mm に減少するまでとし、 その間における排水時間及び最大排水流量も把握する。

STACY 更新炉実機の排水系は、モックアップ試験装置より配管が長くなり、排水 流量が小さくなる可能性がある。排水性能を保守的な評価とするため、内径 65 mm のオリフィス(配管呼び径 JIS 規格 65A 相当)を挿入した状態についても計測を行 う。

(4) 試験結果

急速排水弁1基を開とした場合には、約400 ℓ/min で給水を継続しても炉心タンク 水位は上昇することがないことを確認した。このことから、排水能力は、給水能力 を上回るという結果が得られた。

また、炉心タンク水位 950 mm から 250 mm (水位差 700 mm) の排水時間は、内径 65 mm のオリフィスを入れた場合でも 2 min 程度であった。STACY 更新炉実機の最 大炉心構成範囲は 1400 mm 以下であるため、排水時間は 4 min 程度になるという見 通しが得られた。さらに、最大排水流量については、オリフィス無しの場合で約 2000 ℓ/min、有りの場合で約 1700 ℓ/min となることを確認した。これらのことから、 排水時間及び排水流量についても十分な性能があり、速やかな排水が可能であると いう結果が得られた。

最大給水時の排水性能試験結果を図 3.3.5-1 及び図 3.3.5-2 に示す。



(2) 65 mm オリフィス挿入時

炉心タンク 計測水位 (mm)	水位差 (mm)	排水量 (ℓ)	最大 排水流量 (ℓ/min)	排水 時間 (min)	オリフィス の有無 (内径 mm)
050	700	約 1900	2144	1.13	無(83)
950→250	/00 ポリ	示9 1800	1765	1.43	有(65)

図 3.3.5-1 給水継続状態で急速排水弁 A 系のみを開とした場合の排水性能



(2) 65 mm オリフィス挿入時

炉心タンク 計測水位 (mm)	水位差 (mm)	排水量 (ℓ)	最大 排水流量 (ℓ/min)	排水 時間 (min)	オリフィス の有無 (内径 mm)
050	700	約 1900	1946	1.38	無(83)
950→250	/00 术:	赤り 1800	1718	1.60	有(65)

図 3.3.5-2 給水継続状態で急速排水弁 B 系のみを開とした場合の排水性能

3.3.6 急速排水弁の開時間測定

(1) 試験目的

急速排水弁がスクラム信号発生から1s以内に閉から開となることを確認する。

(2) 背景

原子炉が異常状態となった場合には、スクラム信号により急速排水弁を開とし、 炉心タンクから排水する。このとき、炉心タンクから速やかに排水するための条件 として、急速排水弁の作動時間(スクラム信号発生から全開となるまで)を1s以内 と設定している。このことから、急速排水弁の作動時間が1s以内となることを確認 する。

(3) 試験方法

急速排水弁に開信号を入力し、開リミット作動までの時間を計測する。

(4) 試験結果

急速排水弁の作動時間は1sを超えることを確認した(約1.7s)。しかし、急速排水弁の作動に用いるシリンダから急速に排気する改造を行うことにより、作動時間を1s以内にできることを確認した。

急速排水弁の作動時間が1sを超えた原因は、急速排水弁が閉から開への動作にお けるシリンダからの圧縮空気の排気に時間がかかったためであった。

急速排水弁の動作には圧縮空気とスプリング反力を用いている。この機構は、給水吐出弁及び流量調整弁と同様である。流量調整弁についても弁の作動時間が1sを 超える状態があり、その原因はポジショナーによるものであったが、急速排水弁の 場合はシリンダの大きさによるものであった。

排水系は、炉心タンクから速やかに排水させるため、主たる排水配管の最小径を約80mm (JIS 規格80A)としている。急速排水弁は、この配管径に応じた弁を選定しているため、付属部品であるシリンダも大きくなっている。このシリンダの大きさゆえにシリンダ内の圧縮空気の量も多くなり、その排気に時間がかかっていた。このため、急速排水弁の作動時間を短縮させるにはシリンダからの排気を増加させることが効果的であることから、シリンダ排気口に急速排気弁を設置することとした。これにより、約1.7 s であった作動時間を約0.9 s まで短縮することができ、急速排水弁の作動時間を1 s 以内にできることを確認した。

急速排水弁作動時間の測定結果を表 3.3.6-1 に、急速排水弁の構造概要を図 3.3.6-1 に示す。

なお、排水系のウォーターハンマーについては、炉心タンクからの排水中に急速 排水弁を閉止する必要がないこと、及び閉止時間に安全上の制約がない(1 s を超え てもよい。)ことから、試験及び対策検討の必要はないと判断した。

表 3.3.6-1 急速排水弁開時間測定結果

(1)	改造前
(1)	以但的

测宁阻障	刍油排水金	1回目	2回目	3回目
侧足间隔	志述所小开	(s)	(s)	(s)
信旦ON」問出こットON	A 系	1.72	1.72	1.68
信ち ON 一 囲 リミット ON	B 系	1.68	1.70	1.64
(2) 改造後				
测今间位	卢 油北水会	1回目	2回目	3 回目
侧	忌述初F小开	(s)	(s)	(s)
信号 ON→開リミット ON	A系	0.88	0.88	0.88

※急速排水弁 B 系は未改造のため測定無し。



図 3.3.6-1 急速排水弁の概要図

4. まとめ

原子力機構が進めている臨界実験装置 STACY の更新計画に関し、STACY 更新炉 (棒状燃料及び軽水減速材を用いる熱中性子炉用臨界実験装置)の設計仕様に係る成 立性等を確認するため、モックアップ試験を実施してきた。このうち、給排水系に 要求される性能が給排水システムとして成立することを検証するため、モックアッ プ試験装置を製作し、「給排水系モックアップ試験」を実施した。

給排水系モックアップ試験装置の製作においては、STACY 更新炉の給排水システムと同等性能とするため、各機器及び系統は実機相当とした。さらに、炉心タンクと給水ポンプの設置位置(高低差)についても約 10 m(実機相当)とすることで、 給排水システムが忠実に再現できるよう考慮した。

以下、給排水系モックアップ試験のそれぞれの結果を示すとともに、STACY 更新 炉の給排水システムの成立性及び設計の妥当性を総括する。

4.1 試験結果のまとめ

給排水系モックアップ試験の結果、以下の事項が明らかとなった。

(1) 給水ポンプ性能試験

STACY 更新炉の給水系に用いる給水ポンプ(遠心ポンプ)は、高速給水系及び 低速給水系における炉心タンクへの給水流量(高速 380 ℓ/min、低速 150 ℓ/min)を 確保することができることを確認した。ただし、遠心ポンプの特性上、給水系統 の循環ラインを形成するためのバイパスラインの流量の調整次第で、高速給水系 及び低速給水系の給水ポンプの最大給水流量を超える場合がある。このため、あ らかじめ手動弁等により適切な流量制限を行う必要があるという結果が得られた。

(2) 最大流量の設定(初期設定)

高速給水系及び低速給水系のそれぞれの条件で設定した最大流量は、通常運転 時及び単一故障時(バイパス弁の閉塞時)を含め、炉心タンク内の水位が上昇す るにつれて下がる方向となるため、適切に制限できることを確認した。また、本 試験で行った最大給水流量の設定方法を基に、実機の給排水システムにおける初 期設定手順を決定した。

(3) 給水流量範囲の設定

(調整可能流量)

流量調整弁で調整可能な最低流量は、高速給水系及び低速給水系ともに、 15 ℓ/min 程度であった。これは、最大水位反応度となる炉心(臨界水位 400 mm) における水位上昇速度 0.5 mm/s に相当する流量 75 ℓ/min の 1/5 であり、幅広い流 量調整が可能であるという結果が得られた。また、流量調整に当たっては、給 水バイパス弁の開度調整を行うことでも最大給水流量の制限が可能であるとい う結果も得られた。

(流量調整弁の開度による流量変化)

高速給水系及び低速給水系ともに、流量調整弁の開度 60%以下の範囲では開度と給水流量の関係が線形的に推移し、開度 60%を超える範囲では変化が小さいことを確認した。この結果から、運転中に給水流量を大きく変化させる場合には、開度 60%以下の範囲が適しているという結果が得られた。

また、同一弁開度における給水流量の比較においては、高速給水系で最大 18 ℓ/min、低速給水系で最大7 ℓ/minの変化幅があり、この変化量は最大給水流量 に対して約5%となることを確認した。このことから、流量調整する際の同一弁 開度における変化幅は、最大給水流量の5%を考慮すればよいという結果が得ら れた。

(4) 給水停止時間測定

高速給水系、低速給水系のそれぞれの給水吐出弁及び流量調整弁の閉止時間は、 1 s 以内にできる見通しがあることを確認した。ただし、流量調整弁は、一部改造 を行う必要があること、及び高速給水系についてはウォーターハンマーによる圧 力抑制の考慮が必要であることを確認した。

(流量調整弁の閉止時間)

流量調整弁は、三方弁を用いて弁本体に供給した圧縮空気を外部へ直接排気 する構造とすることで閉止時間を1s以内(約0.65s)にできることを確認した。

(ウォーターハンマーの考慮)

給水系の弁の下流側において、低速給水系及び高速給水系の双方でウォーター ハンマーによる圧力上昇を確認した。この発生圧力は、低速給水系で約0.6 MPa、 高速給水系で約1.3 MPa となり、高速給水系では弁体部の耐圧(1.0 MPa)を超 えることを確認した。ウォーターハンマーの抑制には、流量を抑えることや緩 やかに停止させることが挙げられる。流量については、高速給水系の最大流量 380 ℓ/min に対し、300 ℓ/min とした場合、発生圧力は約0.7 MPa まで低減される ことを確認した。また、緩やかな停止については、高速給水系の最大流量はそ のままに、0.85 s であった弁の閉止時間を1s に調整したところ、発生圧力は約 0.5 MPa まで低減されることを確認した。さらに、この発生圧力は、揚程が高く なる(排水系による循環から炉心タンクへの給水に切り替える。)ことでも小さ くなることを確認した(炉心タンクへの給水時の発生圧力は、閉止時間0.85 s か つ流量 380 ℓ/min の場合でも約0.5 MPa)。

以上のように、給水流量を抑えることや閉止時間を調整することにより、高 速給水系においてもウォーターハンマーを弁体部の耐圧以下に制限できるとい う結果が得られた。

(5) 最大給水時の排水性能試験

高速給水系の最大給水流量を超える流量(約 400 ℓ/min)で給水を継続した場合 でも、急速排水弁1基が開であれば炉心タンク水位は上昇することがないことを確 認した。これにより、排水能力は、給水能力を上回るという結果が得られた。ま た、排水時間及び排水流量についても十分な性能があり、速やかな排水が可能で あるという結果が得られた。

(6) 急速排水弁の開時間測定

急速排水弁の作動時間(スクラム信号発生から開となるまで)は1s以内である ことを確認した。ただし、作動時間を1s以内とするためには、作動に用いるシリ ンダから急速に圧縮空気を排気するための考慮が必要であるという結果が得られ た。

以上のとおり、実機相当の給排水系モックアップ試験装置を製作し、当該装置を 用いて STACY 更新炉の給排水システムに要求される安全性能に関する試験を実施し た。その結果、一部の機器に対しては適切な構造・機構への設計考慮が必要である ものの、要求性能を満足できる見通しを得た。このことから、STACY 更新炉の給排 水系における設計は妥当であり、実機製作に当たり支障のないことを実証すること ができた。

謝辞

本報告書を結ぶに当たり、給排水系モックアップ試験装置の設計及び製作並びに 据付けをしていただいた株式会社関東技研(茨城県那珂郡東海村)の菊池 良一氏、 市毛 邦夫氏、青木 昇氏に感謝いたします。また、本試験を遂行する上でご指導、 ご鞭撻とご援助をいただいた臨界技術第1課の方々に感謝の意を表します。

_

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
本平里	名称	記号			
長さ	メートル	m			
質 量	キログラム	kg			
時 間	秒	s			
電 流	アンペア	Α			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光度	カンデラ	cd			

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例				
AI 立 是 SI 組 立 単位				
名称	記号			
面 積 平方メートル	m ²			
体 積 立方メートル	m ³			
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s			
加 速 度メートル毎秒毎秒	m/s^2			
波 数 毎メートル	m ⁻¹			
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m ³			
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²			
比体積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg			
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m ²			
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m			
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ⁸			
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³			
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²			
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1			
比 透 磁 率 ^(b) (数字の) 1	1			
(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度				

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

	SI租立单位			
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 鱼	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体鱼	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 (b)	m^2/m^2
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
压力,応力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷,電気量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与,	ガレイ	Gv	J/kg	m ² e ⁻²
カーマ		Gy	ong	
線量当量,周辺線量当量,	シーベルト (g)	Sv	J/kg	$m^2 e^{-2}$
方向性線量当量,個人線量当量		50	5/Kg	III 8
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (h)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周期現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。 セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM物告2(CI-2002)を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[組立単位	
組立量	記号	SI 基本単位による 表し方	
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	$m m^{-1} s^{-1} = s^{-1}$
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 卒	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語						
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号	
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с	
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р	
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f	
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v	

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位			
名称	記号	SI 単位による値	
分	min	1 min=60 s	
時	h	1 h =60 min=3600 s	
日	d	1 d=24 h=86 400 s	
度	۰	1°=(π/180) rad	
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad	
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad	
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²	
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³	
トン	t	$1 t=10^3 kg$	

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの				
名称			記号	SI 単位で表される数値
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダル	- F	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	ci単位しの粉結的な間接け
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値	
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J	
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N	
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s	
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$	
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$	
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx	
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²	
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$	
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T	
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹	
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」			

は対応関係を示すものである。

		表	(10.	SIに 帰	属さないその他の単位の例
名称				記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ	IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	トゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$			Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ	3	/	7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	x	N	111		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートルヌ	系カラ:	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	進っ	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カ	П	IJ	Į	cal	1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	カ		~		$1 = 1 = 10^{-6} m$