高速増殖炉実用化へ向けた 三菱のナトリウムループ試験技術と最新設備

MHI's Advanced Sodium Test Technology and Its Latest Facilities toward Practical Use of Fast Breeder Reactor

並木 勝男[*1] Katsuo Namiki
増崎 敏文[*1] Toshifumi Masuzaki
大野 幸彦[*2] Yukihiko Ohno
豊吉 晃[*1] Akira Toyoshi
内海 晴輔[*3] Seiho Utsumi
折田 潤一[*1] Junichi Orita

当社は，高速増殖炉(FBR: Fast Breeder Reactor)の開発を目的に，1975 年以来ナトリウム試験設備を建設・運転し，設計・製作，運転データ，運転ノウハウ，試験技術，評価技術等を蓄積し，FBR の設計に反映してきた．現在までのナトリウム試験技術に関する実績をまとめた．また，現在保有しているナトリウム試験設備の更新を行い，計画的，効率的な試験遂行，試験条件への迅速柔軟な対応，データ処理迅速化等を可能とした．当社は政府より FBR 開発の中核会社に選定されたことを受けて，液体金属冷却 FBR の実用化に向けて，これまでの経験を十分に生かした多数のナトリウム試験を推進し FBR の実用化に貢献していく計画である．

1. はじめに

三菱グループでのナトリウム取扱い技術の研究開発は，三菱原子力工業(株)大宮研究所で1960 年代に始められた．電磁ポンプ，プラギング計，機械式ポンプ，及びその他の様々なナトリウムループ用機器は，この時期に開発されたものである．

当社としては，高速実験炉常陽の建設が始められ，高速増殖原型炉もんじゅの建設が政府によって許可された時期に，神戸研究所に自前のナトリウムループ(KL-1)の製作を開始した．このループの目的は，設計，建設，運転に関する技術者の訓練と，常陽の建設に向けた準備であった(常陽は 1977 年に初臨界を達成)． その後，KL-1 は神戸研究所から，新規開設された高砂研究所に移設された(1975 年)．この時以来，ナトリウム試験設備は，基本的に高砂研究所に建設・運転されてきた．

高砂研究所では，これまで多数のナトリウム試験設備を設置してきた．最近の設備としては，多目的試験施設(MTL-3，MTL-4: Multipurpose Test Loop)，熱過渡試験施設(SASS: Self Actuated Shutdown System)，材料試験設備及び熱流動試験設備(SGTF: Steam Generator Test Facility)がある．現在は MTL-3，SASS 及び SGTF の3つのナトリウム試験設備を保有している．当社は，これらの規模の異なるナトリウム試験設備を最大限利用し，ナトリウム中での各種材料特性，熱伝達，流体力学，トライボロジー，漏えい挙動を効率的に取得し，設計，製作，運転に関する技術者を養成している．ループの運転を通じて様々な技術(予熱，ナトリウムの充填/ドレン，ナトリウム純度管理，電磁流量計の開発，カバーガス制御，ナトリウムとの共存性の研究，水素及び酸素のナトリウム中挙動，ナトリウム機器の洗浄技術，ビニールキャスクなどを用いたナトリウム付着機器のメ

*1 神戸造船所原子力プラント設計部 *2 神戸造船所原子力プラント設計部主席技師
*3 技術本部高砂研究所

ンテナンス技術など)が蓄積されてきた. ここでは, これらナトリウム試験設備の概要と当社の試験経験, 及び現在の状況について紹介する.

なお, 大規模なナトリウム試験設備については, これまで, 現在の(独)日本原子力研究開発機構にて製作, 運転, 評価を実施し, 最終的に実機 FBR プラントへ反映してきており, 今後も同様の分担で FBR 開発が進められていく計画である.

また, 当社は長崎研究所にもナトリウム試験設備を保有しており, ナトリウムの化学的活性を低減させる研究や, セラミックスによるナトリウム純化の研究が行われてきている.

2. 三菱のナトリウム試験設備の最新設備

2.1 多目的試験施設:MTL-3

1975 年に建設され, 1987 年に高砂研究所に移設された. 大口径, 長尺のナトリウムポットを具備し, 材料の浸漬試験, 各種ナトリウム機器の性能特性試験が行える汎用ループである. 外観を図1に, 主な仕様を表1にそれぞれ示す.

図1 多目的試験施設(MTL-3)の外観
MTL-3 の外観(ループと制御盤)を示す. 制御盤は 2009 年の更新により最新設備となっている.

表1 現有ナトリウム試験設備の主要仕様

試験設備	MTL-3	SGTF	SASS
流体	ナトリウム	ナトリウム	ナトリウム
設計温度	550℃	600℃	750℃
ナトリウム純化系	コールドトラップ プラギング計	コールドトラップ プラギング計	コールドトラップ
その他特徴	—	高温ナトリウム系流量:400ℓ/min 低温ナトリウム系流量:800ℓ/min	温度変化率:最大 30℃/s

現有ナトリウム試験設備の主要仕様をまとめて示す.

FBR の1次ナトリウム系での酸素濃度と温度を模擬できることから, ナトリウム中での材料試験や共存性試験に適している. コールドトラップ(ナトリウム温度を一時的に低下させることで, 高融点不純物を析出させ金属メッシュにて捕獲することでナトリウムを純化する装置)温度は 120℃, 設計温度は 550℃である. 試験容器は多用な試験に対応できるよう汎用性を持たせている. アルゴンガス系及び真空系は, ナトリウムの系統への充填/ドレン, 及びナトリウム液面の酸化防止を目的に設置されている. 越流堰が試験容器内壁に設置されていることから, ナトリウム液面のナトリウムを循環させることが可能であり, カバーガス系(ナトリウム液面には, 空気との接触を防ぐために不活性ガスを供給することが要求され, 一般にはアルゴンガスが使用される)の試験が実施できる. 系統図を図2に示す. これまで, ナトリウム中目視装置の研究, ナトリウム中超音波探傷装置の研究, ナトリウム中モータの特性試験, 炉内配管の差込シール部(スライドジョイント)の特性試験, ナトリウムカバーガス中の水素挙動試験などを実施してきた.

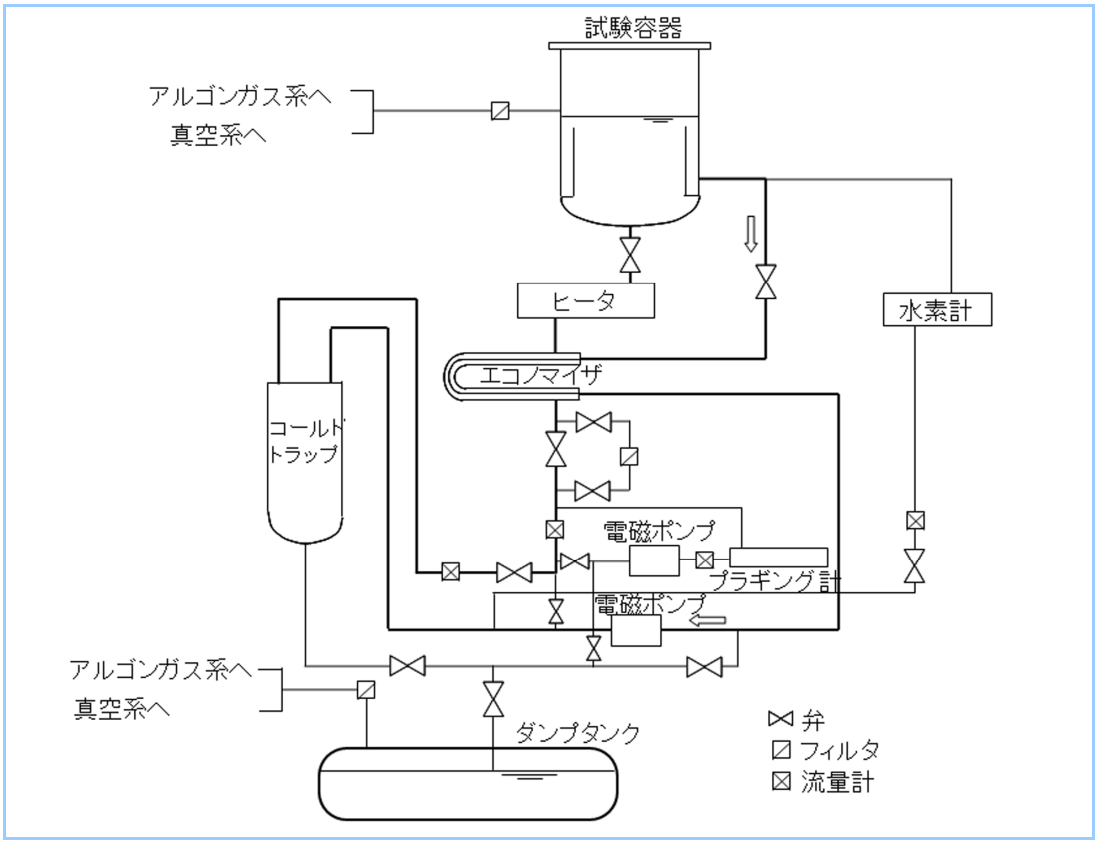

図2 多目的試験施設(MTL-3)系統図
MTL-3 の全体系統を示す. 試験容器の形状(越流堰), 純化系コールドトラップとプラギング計を備えるところが特徴.

MTL-3 は, 30 年以上の長期間の運転に伴う老朽化が進んでいたため, 信頼性の向上と試験に対する柔軟性を改善することを目的に 2009 年に設備更新を行った. 制御盤はデジタル制御盤に交換した. 電磁ポンプ, アルゴンガス制御盤, 保温材及び予熱ヒータを交換した. これにより設備故障による計画外停止のない計画的な試験遂行と運転省力化による効率的な試験, デジタル化によるデータ処理の迅速化が可能となっている.

2.2 熱流動試験設備:SGTF

SGTF は元々ナトリウム加熱型蒸気発生器(SG)の伝熱及び熱流動試験用に 1985 年に製作された. 大型機器性能評価のための熱流動試験用ループであり, 高温ループ(400ℓ/min)と低温ループ(800ℓ/min)の2つのナトリウム系を具備する汎用装置である. 外観を**図3**に, 鳥瞰図を**図4**にそれぞれ示す. ナトリウム容量は約8トンである. また, 主要仕様を表1に示す.

ナトリウム流動, 原子炉容器カバーガス流動, 機器の性能評価, SG 伝熱管の伝熱性能評価, 配管エロージョン試験などに適している. 原子炉容器内のナトリウム流動及びカバーガス流動を模擬し, 原子炉容器壁冷却系などの性能を実証するためには, 試験容器のナトリウム容量は 3～5m^3 必要である. また, SG 伝熱管の熱伝達特性試験, 配管エロージョン試験については, 約 800ℓ/min のポンプ容量が必要である.

SGTF は製作後 25 年経過しており, 長期間の運転に伴う老朽化が進んだため, これを改善し, 信頼性と試験に対する柔軟性を向上させることを目的に 2010 年に更新工事を実施した. 制御盤はデジタル制御盤に交換した. 電磁ポンプ, 予熱ヒータ, コールドトラップ, プラギング計, 試験容器を交換した. なお, プラギング計は自動制御化した. この更新工事により計画的な試験遂行が可能となり, また様々な試験条件(設定値, 寸法など)に迅速, 柔軟に対応できるようになった. さらに運転省力化による効率的な試験, デジタル化によるデータ処理の迅速化が可能となっている.

2.3 熱過渡試験設備:SASS

高温ナトリウムタンク，低温ナトリウムタンクを具備し，テストセクションに設置した供試体へ，高温/低温ナトリウムを切り替えて供給し，熱過度をかけることが可能な専用設備である．750℃，30℃/s までの試験が対応可能であり，温度揺らぎや偏流が極めて小さい試験ループである．これまで，熱伸長制御棒(ETEM)及び自己作動型炉停止系(SASS)の要素試験が行われた．主要仕様を表1に，外観を図5にそれぞれ示す．高温及び熱過渡に対する安全対策として，このループは鋼板によってループ全体を囲んでいる．また，万一の火災発生時には，窒素ガス及びナトレックス(ナトリウム消化剤)を供給できるようになっている．このナトリウム漏えい対策設備は，もんじゅでの2次系ナトリウム漏えい事故後に設置したものであり，後にもんじゅに適用されるナトリウム漏えい対策(窒素消火など)を先取りしたものである．

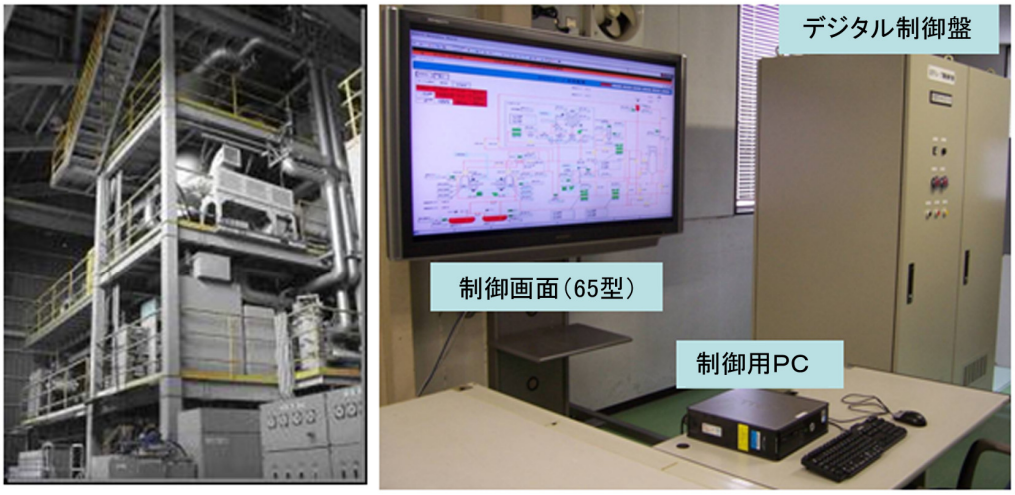

図3 熱流動試験設備(SGTF)の外観
SGTF の外観(ループと制御盤)を示す．制御盤及び制御画面は 2010 年の更新により最新設備となっている．

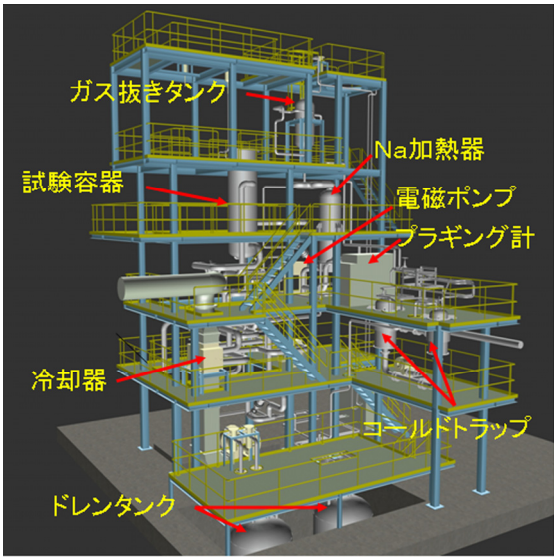

図4 熱流動試験設備(SGTF)の鳥瞰図
SGTF ループの全体規模を示す．

図5 熱過渡試験設備(SASS)の外観
SASS の外観を示す．ナトリウム漏えい対策のため，鉄板で覆われているのが特徴．

3. 三菱のナトリウムループ試験技術

3.1 試験実績

FBR に関して，疲労試験，クリープ疲労試験，材料及び配管ベローズの浸漬試験，ナトリウム中モータ特性試験，SASS の耐熱試験，スライドジョイントの摺動試験，ナトリウムカバーガス中水素挙動試験，熱伸長制御棒試験，原子炉容器壁の伝熱特性試験（炉壁冷却試験），改良9Cr-1Mo 鋼製蒸気発生器伝熱管の伝熱特性試験，ナトリウム中超音波センサに関する試験等を行ってきた．ここでは，これまでに当社で実施した試験実績について述べる．

(1) 空気冷却器

常陽向けナトリウムの空気冷却器の熱伝達性能を KL-1 にて確認した．KL-1 の主空気冷却器に，常陽と同一のフィン付伝熱管を設置して試験を実施した．常陽の空気冷却器の設計で使用する熱伝達評価式を，熱伝達実験により決定した．

(2) ナトリウム純化設備

当社は常陽の2次ナトリウム系にコールドトラップを納入した実績を有する．コールドトラップについて基礎的な試験を行い，圧力損失と捕獲した酸化物の量の関係について試験データを取得した．結果は常陽の運転手順書にも反映されている．ナトリウム中酸素計，ナトリウム中水素計についても開発を行っている．

(3) ナトリウム燃焼

漏えいした液体ナトリウムは，空気に接触すると燃焼して多量の煙を発生する．また，コンクリート床への漏えい時は，コンクリート中の水分と反応し，水素ガスを放出する．当社は，1975 年以来ナトリウムの漏えいと燃焼について研究してきた．もんじゅのナトリウム漏えい対策である窒素消火に関連する試験も実施し，設備設計に反映している．

(4) 微小漏えい検知

配管などからのナトリウム漏えいを，早期に検出し処置するため，ナトリウムイオン化式検出器(SID)，差圧式検出器（DPD）などの微小漏えい検出器を開発した．これらは，もんじゅに採用されている．また，より高感度のレーザ励起式のレーザ漏えい検出器(LLD)についても FBR 実証炉向けに開発研究を実施している．

これらの検出器開発と同時に，検出器の配置などの検討に資するため，微少な漏えい時の配管周辺ナトリウムの広がり，流動性を求める試験も実施している．

(5) 保守技術

ナトリウム機器の保守のためには，ナトリウム中からの機器の引き抜き，配管切断，機器の分解，付着ナトリウムの除去・洗浄，廃ナトリウム処分などに関する技術が必要である．当社にて初めて大型ナトリウム機器の解体・洗浄を実施したのは，米国エンリコフェルミ炉の SG である．伝熱管材料の調査目的だが，事前作業としてナトリウム除去，解体が必要となった．まず，安全が確保できる方法を準備試験にて確認した上で，SG の分解とナトリウム洗浄を実施した．

また，旧動力炉・核燃料開発事業団（旧動燃）の 50MW SG を用いて，現地で管束を胴体から引き抜いて，現地で補修できると想定した場合と，メーカ工場に持ち帰り補修する場合の2種類の想定の下に，SG の分解とナトリウム洗浄の基礎試験を実施した．試験後，再び SG 本体に管束を組み込み，ナトリウム運転を問題なく実施でき，一連の技術を習得，確立することができた．

(6) カバーガス制御

ナトリウム液面には，空気との接触を防ぐために不活性ガスを供給することが要求され，一般にはアルゴンガスがカバーガスとして使用される．ナトリウムは蒸気圧が高いこと及び温度分布（下部のナトリウム液面は高温で，上部のカバーガス系は低温）がつくために自然循環が生じ，液面からナトリウム蒸気が発生し，カバーガス空間に付着して問題を生じることがある．カバー

ガス空間での付着ナトリウムに関する研究を実施している.

(7) 熱伝達

低プラントル流体であるナトリウムに適用できる熱伝達率のデータは，以前から各種研究機関で取得，公表されている．しかし，FBR の設計が具体的に進められ，特殊な条件での伝熱特性評価が必要となり，多数のナトリウムの流動，伝熱の解析が行われてきた．特に，ナトリウムは出入口での温度差が大きいことに起因する熱衝撃，密度差成層が問題となり，その現象解明，対策試験を多数実施し，設計手法に反映してきた.

(8) 炉壁冷却

原子炉容器の設計温度を下げるために，原子炉容器入り口ナトリウム流量の一部を用いて原子炉容器壁を冷却することが考えられる．このような炉壁冷却を行うために必要なナトリウム流量を算出する設計手法を各種試験により設定している.

(9) 蒸気発生器(SG)

当社のナトリウム加熱型蒸気発生器の製造経験としては，旧動燃向けの 50MW SG，及びもんじゅ SG の蒸発器がある.

FBR 実証炉向けの一体貫流型 SG(交換熱量 500kW)2基(1基は文殊蒸発器と同じ 2.25Cr-1Mo 鋼製，1基はより高温強度に優れた改良 9Cr-1Mo 鋼製)の耐久試験を実施した．軽水炉向け SG 試験の経験も生かして，ナトリウム加熱 SG を初めて運転した結果，約 1.5 年間ノートラブルで運転できた．運転完了後に2基の SG を湿り窒素ガス法で洗浄し炭酸ガスで安定化処理して，解体検査を実施し，様々なデータを取得した．SG 内部の温度分布について試験結果と解析結果を比較検証した．水側の核沸騰限界(DNB)試験では，DNB クオリティ，DNB 点の移動距離，温度変動幅，変動周波数などを確認した．また水側の流動不安定性試験では，ナトリウム加熱型 SG の流動不安定データを取得し，流動不安定性判定コードの検証を行うためのデータを取得した.

3.2 今後の試験予定

前述のとおり，当社は，長期にわたるナトリウム試験設備の運転により以下に示すようなナトリウムに関する多くの技術を取得し，高速増殖炉の設計手法，運転手順に反映してきている.

①ナトリウム取扱い技術（純度管理，及び保守補修技術）

②ナトリウムの伝熱特性，ナトリウムの熱流動特性

③ナトリウムの漏えい，燃焼挙動

④ナトリウム中の材料物性

今後は，当社保有のナトリウム試験施設を用いた材料の疲労試験，摺動磨耗試験，材料浸漬試験，ナトリウム中での補修試験，ナトリウム中での検査装置の機能試験，燃料交換機の試験が計画されており，今後数年かけて実施し，FBR の実用化に貢献していく予定である.

4. まとめ

当社のナトリウム試験設備の概要を紹介し，設計製作，運転，評価に関する経験についてまとめた．FBR 開発の中核会社として，液体金属冷却 FBR の実用化に向けて，これまでの経験を十分に生かした多数のナトリウム試験を推進し FBR の実用化に貢献していく計画である.