

第4回日独高速炉会議報告

川口 修* 三本保秀*
金子洋光* 大坪 章*
加納 巖* 小松純治**

1. まえがき

昭和46年5月26日に締結された日独高速炉協定にもとづき、51年5月11日から21日まで第4回の年会在ドイツ、ベルギー、オランダで開かれた。

1年半前に東京で行われた第3回年会の結論にしたがって、今回は協定の範囲に含まれる項目の全般的なレビューの他スペシャルセッションは安全、燃材、計測、構造材料に限定された。

会議では開発状況の情報交換、今後の協力方法の具体案の作成が行われ、またドイツ、ベルギー、オランダの各研究施設および原型炉SNR 300の建設現地カルカーを訪問した。

おりしも独一仏の産業界も含めての広範な協力協定が結ばれようとする時期であったが、P-NC-DeBeNe間の現協定も継続されることが合意され、会議はきわめて友好的かつ積極的協力の雰囲気で行われた。

筆者のほか、大山理事および木下国際協力室長が、主としてGfKでの会議に出席した。

2. 会 議

2.1 開会セッション

まずGfKの原子炉開発と安全性の managing Director であるDr. Hennisと大山理事の挨拶および両サイドのLMFBR開発の概況報告が交換された。

日本とDeBeNeの間の過去5年間の協力関係は有意義であったと評価され、今後の協力関係の継続が合意された。

つぎにDeBeNe側のLMFBR開発プログラムの現状が紹介された。その内容のおもな点はつぎのとおりであった。

① SNR 300

1973年建設開始。1980年半ばに臨界の予定で工事進行中。発注者はSBK（独RWE（70%）、オランダSEP（15%）、ベルギーSYNATOM（15%）の共同出資）で、受注者はINB（独IN TERATOM（70%）、オランダNERATOM（15%）、ベルギーBelgoNucleaire（15%）共同出資）である。

② SNR II

予備設計終了。1300MWeに決定。SNR 300で忙しく人手をさく余裕もないので、スケジュールははっきりさせられない。Super Phoenixとの関係も落ちついていない。発注者としてはESKが設立された。受注者はINBである。

③ KNK II

Na冷却熱中性子炉KNK Iを高速炉に変換する作業が進行中で、1977年春には臨界の予定である。これは日本の実験炉に相当する。

開発体制が非常に複雑で各国間のバランスをとりながらの開発には苦勞が多いことが見受けられた。またFBRに関するライセンスは部分ライセンスを積重ねる方式になっており、多大の時間を要するようである。許認可対策がこのセッションの大きなトピックスになっていた。

またFBR開発協力に関するDeBeNeと英国の交渉は失敗したが、仏との交渉は成功した、との報告があった。

* 動力炉・核燃料開発事業団高速増殖炉開発本部

** 動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター燃料材料試験部

2.2 安全セッション

局所および全炉心事故解析コード開発の現状の発表があった。関連した実験計画について述べる。局所閉塞の炉外試験はGfKのPepplerおよびRCNではほぼ計画どおりのスケジュールで実施されており、特にGfKの試験の解析は英国と共同で、英国で開発された解析コードSABREを使って行われている。ただ5月現在ではSABREは手直しを英国でやっているとのことであった。局所閉塞の炉内試験MOL7Cは第1回の試験を今年11月に開始すべく装置製作中である。全炉心事故解析に関連した実験のうちCABRI(独・仏・日・英の協同プロジェクトで反応度模擬炉内試験)はほぼ計画どおりすすんでおり、第1回の試験は来年はじめに開始される予定である。またフランスが実験した冷却材流量喪失試験SCARABEEは独、英が協力して解析を実施している。またオランダのRCNでの炉内試験LOC、SHOTも継続中である。解析は独で開発したBREDACコードで行う。なお安全性に関する解析コードのアブストラクトを交換することが合意された。

UO_2/PuO_2 およびNaの状態方程式を求めるためのレーザーを使っての試験は継続して実施しており、将来はカーバイト燃料、FPを含む燃料、ステンレス鋼についても実験する計画である。

エアロゾルに関しては挙動試験を継続して実施しているがSand bed filterについては実用可能な段階に到着した。PNCの改良フィルターについても関心を示していた。

FPガスの燃料ビンバンドル内放出試験に関しては双方で試験が進行中であり結果を交換することで合意された。

配管の信頼性試験(Leak before Break)については協力の可能性を検討することになった。

耐衝撃試験に関しても材料の衝撃引張り試験も含め情報交換および協力について検討してゆくことになった。

2.3 燃料セッション

1974年の会議以降進歩したことはSNR 300、

MK 1a燃料ビンの確性照射がひととおりおわり、燃料要素の仕様が決まったことである。したがって開発の主体がMK IIやSNR IIの燃料材料に向けられてきた。将来の方向はもちろん経済性であるが信頼性、高燃焼度、高増殖利得を開発目標としている。おもなトピックスはつぎのようである。

- (1) 酸化物燃料と被覆管：高速中性子下で約223本の燃料ピンを照射し、最高燃焼度はSNR 300 MK 1a用にラプソディで照射した2集合体で10.6a/oに達し健全であった。しかし照射量は $6.4 \times 10^{22} \text{nvt}$ (0.1Mev以上)でこれはMK 1a目標値の約半分で高照射量のスエリング把握につとめている。被覆管はスエリングやクリープ特性、それに内面腐食の点からも優れた1.4970 (10-15% CW、Ti安定化材)を採用し、ラッパ管には1.4981 (Nb安定化材)を使用する。もしスエリング量が $1 \times 10^{22} \text{nvt}$ で10%を越すようであれば、Ti安定化材1.4980、A286、12×RN 72など代替材、さらに1.4923、1.4914、PE16などの改良材を考えている。TiやNbで安定化したステンレス鋼は照射前の熱処理でTiC、NbCを形成し、ボイドの形成や成長に大きく寄与する M_{23}C_6 の析出をおさえる。また1.4970にはBが80ppmほど入っているが、TiCを分散させクリープ特性をよくする働きがある。照射による塑性変形にはスエリングで誘起される炉内クリープを考慮する必要があるという。
- (2) 欠陥燃料照射：フランスと共同でSILOE炉を利用し燃料の破損挙動を調べている。定常状態あるいは出力サイクル時の燃料やFP放出特性、配管系への沈着、FPの化学形、燃料とNaの反応、欠陥の拡大、ビンの変形、破損検出法などがおもな研究内容である。
- (3) 制御材：SNR 300、MK IIでは540日の制御材使用が必要であるが、現在MK IのB₄Cは200日位しか使用できない。したがってB₄CやEuB₆のVented型あるいはEu₂O₃のClosed型を検討している。
- (4) 改良型燃料：Heボンドの炭化物燃料につきスエリングや燃料と被覆管の機械的相互作用

用を中心に実験をすすめている。ALKEMに500kg/Yearの製造施設をつくっている。

2.4 計測セッション

計測関係のまとまった討議としては、5月12日午後に双方が開発成果を出し合ったメイン・セッションと、その前日のMOL 7C用小型流量計およびKNK II用小型炉内核分裂電離箱に関する担当者レベルの会議、13日の計測に関するコンクルージョン打合せおよび17日のINTERATOM社での質疑であった。

メイン・セッションでは日独双方の最近の成果を紹介し合った。GfKは集合体出口の温度計の信号から局所異常を判断する方式、音響検出器による炉心異常検出のための実験検討、永久磁石の温度および照射による劣化試験、中性子ノイズによる沸騰検出の検討、などについて説明した。日本側からは計測器開発一般についての開発成果、小型流量計および小型炉内核分裂電離箱の最近の成果について紹介した。

日本から小型流量計、炉内核分裂電離箱の成果を紹介したのは、それぞれドイツのMOL 7C、KNK IIで日本製のものを使用する予定であったからであり、11日の午後にはこれらの検出器供給について担当者レベルでの細い打ち合わせを行った。しかし、帰国後、小型流量計はドイツ側の試験工程の都合で、電離箱は見返り情報について合意が得られず、計画中止となった。

INTERATOM社では、事前に出してあった質問書の半分位を聞くことができた。大口径の電磁流量計の校正は、水で±1%の精度に校正したベンチュリー型流量計を用い、ナトリウム中で永久磁石式流量計を校正し±2.5%の精度を得るといっていた。この精度は規制側からの要求である。ナトリウム透視器（ナトリウム中の構造物の影像を超音波を用いて見る装置）の開発もすすめているが、日本のように燃料集合体の浮き上りを検査することを主目的にはしていない、ということであった。SNR 300の炉心熱出力は水系から校正してくるということで、その精度を3～4%とみているという説明であった。

CENのMOL 7Cの試験体のどこに小型流量

計を入れるか説明を受けてきたが、帰国後ドイツの都合で送らないことになったので、単に聞いてきたということになってしまった。

2.5 構造材料セッション

このセッションでは、これにききだって4月5～8日に来日してこの分野の日本側の研究開発状況を調べたBraun (TNO)、Grosser (IA) Knuth (GfK) 氏らと、Kessler (GfK)、Coe hoorn (RCN)、Tas (CEN/SCK) 氏らが参加して、4月に合意したこの分野における日独協力の進め方について話し合いが行われた。

独側はSNR 300とSNR IIの設計のために、1975年から4ヶ年計画で、オランダ、ベルギーとも協力してかなりまとまった構造材料試験を展開しているが、不足する設計データについては諸外国と協力して補っていききたい方針であり、協力をすすめていきたいという意向がKessler氏より表明された。これに対して、日本側はこれに応じる方針であるが、まず独側の実情を十分に知りたいので、DeBeNe 諸国の研究所訪問時に関連施設を見学したいという希望を述べ、了承された。また今後の協力のすすめ方については、日本側は4月の会議での合意事項を正式なものとしたうえで、そこに示された7項目の分野あるいは内容について十分に検討し、具体的な提案を送り、その後、必要に応じて専門家会議などを行うことを確認した。独側提案によれば、単なる文献あるいは専門家会議による情報交換だけではなく、試験条件を共同で計画して定めるCombined Programを希望している。このようなやり方はわが国ではほとんど経験のないため、どのようなルールですすめていくべきかという点について不確定な点が多いが、共同で実施することによる利点もいろいろあると考えられるので、今後この問題について慎重にとりくむとともに、実りのある協力体制を実現していく必要があろう。

3. 施設見学

日独会議の独側メンバーとして、北欧3国がはいっているのので、見学した施設は下記のように各所にまたがっている。

3.1 GfK

- (1) プルトニウム燃料実験室：画像解析によって燃料内Puの均一性、ボイド分布を測定している。EMF法によるO/M測定技術を開発しALKEMの製造工場に取入れる予定である。炭化物燃料は不活性雰囲気下でカーボサーミック法により製造している。
- (2) ホットラボ：1964年に完成した5基の α - γ ライニングセル(遮蔽能力 10^6Ci , 1 MeV)があり、外観、寸法、重量測定、金相試験のほか内圧クリープ試験やセル前面で燃料内残留FPガスの分析などができる。現在可搬型ボックスを内蔵した金相観察用鉛セル5基とX線回析装置2台を入れるセルを増設している。
- (3) Transuranium Institute ホットラボ：1966年に完成した α - γ セル7基(10^6Ci , 1 MeV)はPNCの照射燃料試験室と施設的にまったく同じ構造である。そのほかCfを取扱う化学セル、4-5年前にホット更衣室を改造して増設した組織観察用鉛セル5基(10^2Ci , 1 MeV)が狭い部屋にならんでいた。
- (4) KNK II：熱中性子炉をNa冷却高速実験炉に改造したもので、炉中央に7体の(U, Pu)O₂試験集合体がある。1976年末臨界を目標に最終段階の工事をすすめていた。完成後は照射炉として利用する。
- (5) 安全関係研究施設：Na沸騰関係ではMol 7 C モックアップ試験、169本ピンの局所沸騰試験、Na液膜厚き測定試験、水ループ局所閉塞試験；ラッパ管の耐衝撃試験；熱伝達試験関係ではスパーサー後の流速測定、ピンの偏りと表面温度との関係、ミキシング試験、コロージョン試験、ヒーターピンの開発、FPガス放出試験；事故後崩壊熱除去に関しては炉容器内の溶融燃料の熱輸送解析実験、炉容器外に溶融燃料が出た場合の熱輸送実験を行っていた。

3.2 KWU

Heide氏(KWU)の案内で川口、三本、加納は、西独軽水炉の設計・建設会社であるKWUの主力工場、Mülheim Factoryを見学した。

西独の原子力機器の主力工場かと考えていたがここではタービンおよび発電機の製作が中心であった。軽水炉の設計および建設のエンジニアリング技術は自社のFrankfurt部門(約3500人)にまとめ、大洗工学センターのような研究所(約3500人)をErlangenに置き、機器の製作はほとんど外注していた。

高速炉機器については、SNR 300用の高压タービンがほぼ組立完了状態で、発電機は組立作業中であったが、ポンプ、IHX、SGなどは高速炉開発初期の約束にもとづき、オランダのメーカーに発注し、オーストリアのLinzにあるVoest社で製作された炉容器はサイトへ運ぶためにドナウを下り地中海に出て、北海からラインを登る旅の途中という。

日本の軽水炉メーカーはいずれもエンジニアリング部門と製作部門が一体となっているのに対して、西独のKWUはまったく異なったシステムをとっている点が印象的であった。

3.3 ALKEM

フランクフルト郊外ハナウの町にあるALKEM社はKWUの子会社としてドイツ唯一のPu燃料製造工場である。1973年に軽水炉Pu燃料の生産をはじめ、現在軽水炉燃料に対し40t/year、高速炉炭化物燃料について10t/yearの製造能力がある。炭化物燃料についても500kg/yearの施設をもっている。現在Pu貯蔵施設の増設を検討している。1977-1979年にかけてSNR 300初装荷燃料の60%を製造する予定である。製造施設は2つにわかれ、1つは粉末調製、焼結などの開発試験施設他は自動化を取入れた大量生産施設になっている。焼結ペレットは全数セントレス研磨し乾燥する。低密度ペレットはスクラップ回収粉を混ぜ調製する。EMF法によるO/Mの定常測定には1-2年必要とのことであった。集合体組立てはALKEMでは行わずRBGで行う。転換工程で脱硝時生ずるガスはウォータースクラバーを通して排気する。Amの分離が問題のようであった。

3.4 INTERATOM

この会社はKWU社の100%持株会社で、西独唯一の高速炉開発メーカーであるが、やはりエ

エンジニアリング技術の開発だけにしぼっており、機器製作設備は持たない。

高温炉の設計に直結するような多くの試験装置があり、ポンプ運転中にバイパスから低温Naを流して熱応力を加えるAPBループ、SNR 300のモックアップ炉容器、炉内水流動試験装置、燃料集合体など、各種の小型流動試験をするAKBループなどを見学した。また構造材料についてはクリープ試験室、疲れ試験装置などを見学したが、この他に、新しい4階建、22m×36mの建物を建設中で、ここをオフィスと材料強度試験室として利用する予定ということであった。

主要機器の設計がこの会社で行われているため、各種R&Dの試験計画が実際の設計と直結して丹念に実施されているという印象をうけた。

燃料関係ではSNR 300燃料のライセンスリングの責任を負っており、燃料材料の仕様の検討、調整、燃料製造のSupervise、燃料設計解析などを行っている。

SNR 300の燃料製造はドイツのALKEMとベルギーのBelgoNucleaire(BN)の二社が担当するので、INTERATOM社は燃料製造と設計の間の調整に苦勞している。たとえばBN社とは連絡調整委員会のようなものを設けて細かい問題まで意思の疎通ができるようにしている。

燃料挙動解析コードIANBUSはBNのCOM METH-IIとともにライセンスリングに用いることを規制当局に認められたとのことである。

SNR 300燃料や制御棒などの設計、仕様、許認可などに関する情報はINTERATOM社に集中している。

3.5 CEN(MOL)、BN

モルの研究センターではつぎの施設を見学した。

- (1) プルトニウム燃料実験室： 照射試料の製造、製造工程改良に力を注いでいる。成形法、溶接法、Puの均一性などにつき研究をしている。
- (2) デッセル工場： BNのPu燃料製造工場で、1973年より操業を始め60t/yearの製造能力があり集合体組立も行う。6連式自動プレス、10kg/hの焼結炉、端栓溶接チャンパー内で

HeリークテストとX線検査ができる。転換工程はない。SNR 300の燃料は1976年末より開始予定でちょうど予備試験をしている。

1.4970被覆管の溶接は難しいようであった。

- (3) ホットラボ： 金相試験、材料試験、化学分析などができEPMA、SEMもある。光顕セルを増設中であった。アクチナイドを取扱ってきたセル内グローブボックスの窓が放射線損傷で見えなくなり、ちょうど大がかりなボックス解体作業をしていた。
- (4) 廃棄物処理施設： α廃棄物を処理するαホールは1969年より操業をはじめ、大型廃棄物の切断、プレスなど行っている。不燃性廃棄物を高温炉で焼きかためスラグにする試験をしていた。灰やスラジはピチュメンで固化処理する。
- (5) MOL 7C： CENではMOL 7Cの実験準備とナトリウム・ループおよび研究炉BR-2などを見学した。MOL 7Cの試験体は、部品や検出器などは購入するが、組立ては自ら行うということです。

3.6 SNR 300(KALKAR)

SNR 300は当初計画より約1年の遅れで建設が進行中である。見学当時主建屋は1/3位の高さまでできていて、圧力容器は1977年1月からの据付を予定している。SG建屋は天井を除いてほぼ終了、タービン建屋ではコンデンサーを据付中であつた。1978年に燃料装荷、1980年臨界、1981年にフルパワーの予定になっている。

グラント復水器冷却はライン川からの取水による方式以外に、ライン川の洪水時に備え空気冷却塔を備えるよう規制当局の要求があり設置することになった(まだ建設は始まっていない)。使用済燃料貯蔵庫はNa冷却とガス冷却の2ヶ所がある。コールドトラップを使用後に交換できるようにになっていることもSNR 300の特徴の一つである。また主建屋の建築と同時にスチールライニングを進行させている工法もおもしろい。このためスチールライナーがコンクリート流し込みに利用されている。

3.7 TNO(APELDOORN)

TNO は委託研究を行う大きな工学研究機関(計4400人)であり、オランダ各所に分散している。本部はハーグにあるけれども、Center と呼ばれる研究所(550人)は Apeldoorn にあり、そこにある Nuclear Energy Group が、高速炉開発に関連する R & D を実施している。このグループ担当理事の Braun 氏から概要説明があり、TNO では特に材料、熱交換器の熱伝達と圧力損失、ポンプのベアリングとシール、それに Na 技術などに関する研究を分担しているという紹介があり、おのおのの分野の専門家による詳細説明をうけた。

施設はひとつと見学したが、明るい建物の中で新しい試験装置が多く運転されており、雰囲気的にもインターナショナルな、オープンな感じが満ちていた。構造材料試験室は3年前に建設された立派なものがあり、さらに配管要素などの構造物試験装置を建設中であった。また短時間で補修溶接するためにリモートコントロールで溶接し、グラスファイバーやビデオカメラを使用して、特に光をあてなくても Weld pool がはっきり観察できる装置を開発し、これを作って実際に溶接施工試験をしていた。

3.8 RCN (PETTEN)

ペッテンではホットラボ、HFR、エアロゾル研究室、ナトリウムループを見学した。

- (1) ホットラボ： 1964年に操業開始し、低サイクル疲労試験、インストロン引張試験、シャルピー衝撃試験、クリープ試験など材料試

験と燃料ビンの非破壊試験、金相試験、化学分析もできる。非遮蔽型 EPMA や SEM もある。

- (2) HFR： 被覆管破損を調べる SHOT 実験、冷却損失時の挙動をしらべる LOC 実験の模擬計装キャプセルをもとに説明をうけた。照射孔は11あり SHOT 実験用に2-3孔同時使用が可能である。LOC 実験は秒単位でおわるが実験のさいは炉室外に退避するという。
- (3) エアロゾル研究室： ナトリウム蒸気の蒸着機構につき、モデルを実験的に確めるための装置 SAUNA を最近完成した。Incoloy 製 150ℓ 容器の下部に 10ℓ のナトリウムを入れ約 750℃ で加熱してゾルの形成消滅機構について研究している。

4. 閉会セッション

5月21日オランダの RCN で J.A. Goedkoop の座長のもとで開かれた。閉会セッションの主要テーマは各セッションで得られた今後の協力に関する結論の調整および確認であった。全般的な結論としては協定の延長、KNK II の耐震設計に関する日本側の技術援助の要請、EURACOS 遮蔽実験の報告書の PNC への提供が合意された。各技術セッションの結論も詳細に検討合意されたが、これらの主要なものは各セッションの節で述べられているのでここでは省略する。