液体金属技術の進展と エネルギー産業における利用

(大阪大学工学部) 宮崎慶次,
(動燃事業団) 亀井 満, (朝東芝) 根井弘道

液体金属は優れたエネルギー輸送媒体であるが、最近Na取扱い技術、機器開発に著しい進展がみられる。核融合では、Liを冷却材に使う開発が進められている。宇宙用には、各種液体金属が早くから注目されてきた。一般産業用では、高温ヒートパイプ用や太陽熱利用に液体金属が使われているし、水銀蒸気タービンなどが試作された。また、液体金属MHD発電があらためて注目されている。電気自動車用や電力貯蔵用NaS電池の開発、鉄鋼や冶金などの分野と液体金属技術の交流が進んでいる。

液体金属技術は、原子力技術の再活性化のためにも、他の先端分野との交流を深めながら、先進的なエネルギー工学の将来を担うものと期待される。

I. はじめに

一般に液体金属は、金属としての特徴と液体としての特徴を兼ね備えた興味深い特性を示す。金属としては、高い電気伝導性と熱伝導性、化学的活性および不透明性などである。液体としては、流動性は当然であるが比較的高い沸点と融点を持つのが普通である。常温で液体であることにより液体金属の代名詞的存在である水銀が最もポピュラーであるが、高温でも加圧を要しない液体金属は、エネルギー輸送媒体として早くから注目され、直接電磁流体力学(MHD)発電や熱交換器の熱媒体として考えられてきた。一方、アルカリ金属では、激しい金属-水反応や火災の危険があるため、取扱いには細心の注意が必要である。

原子力分野での液体金属技術といえば、なによりもまず、高速炉のナトリウム(Na)技術がある。Na技術は、高速増殖炉(FBR)の開発に伴い著しい進歩を示し、各種材料との共存性、不純物の制御技術、各種計測技術、物理的・化学的特性などが明らかになり、また確立してきた。特に大量のNaを取り扱う技術は、多くの実験施設が建設され精力的な努力が積み重ねられた結果、ほぼその技術的基盤は確立したものとみなされている。

さらに最近では、核融合炉のリチウム(Li)技術の開発が行われるようになってきた。宇宙用のエネルギー源の開発の必要性が高まり、改めて液体金属の重要性が認識されるようになってきた。

このような技術的進展は、従来開発されなかったが完成しなかった液体金属を扱う機器を、改めて見直す

機運を提供するようになってきた。また、今後開発されようとしているシステムを液体金属を使ったものとしようとする動きに影響するものと思われる。

原子力技術開発の活力を今後も維持し、さらに発展していくためにも、先端技術としての液体金属利用技術を今後も高度に取り入れるとともに、一般産業用に技術移転を図り、技術交流を進めることが重要と考えられる。

このような目的で、広くエネルギー分野で、液体金属を使ったシステムの現状をレビューしてみる。

II. 高速増殖炉

世界最初の液体金属冷却の高速中性子炉心が、米国で1946年に臨界になってから40年以上経過し、発電炉としてFBRは原型炉から実証炉段階に移行しつつある。わが国においては1967年(昭42)に動燃事業団が発足して以来、冷却材としての液体金属Naの大規模な技術開発が精力的に進められてきた。Na技術としても、原型炉段階の研究開発は一応完了し今後は大型FBRとしての研究開発へと移行していく。

FBRは電力生産だけでなく、水素生産、宇宙空間での利用、核消滅利用等、FBRの特長を活かした展開が考えられ、用途に合致した液体金属利用の開発へ展開していく必要がある。

Progress of Liquid Metal Technology and Application in Energy Industries: Keiji MIYAZAKI, Mitsuru KAMEI, Hiromichi NEI.

(1990年 6月13日 受理)

1. 材料開発

FBR大型炉は、経済性の向上、高性能化、高信頼性等を図り、適切な裕度で評価できるようにするため、高温用新材料の開発やデータベース化を図り、材料評価手法を高度化する必要がある。

燃料被覆材等の炉心材料は高温、長寿命化を目指して、改良 SUS 316 鋼や高強度フェライト鋼の開発が進められている。高速炉炉心改良 SUS 316 鋼(PNC 316 鋼)は SUS 316 鋼に微量元素リン(P)、ホウ素(B)、チタン(Ti)、ニオブ(Nb)を適量添加し、冷間加工度を20%に調整することにより高温クリープ強度と耐スエリング性を向上させた。さらに耐スエリング性を改善するために、15Cr-20Ni-2.5Mo-0.25Ti-0.1Nb-P, B 鋼(PNC1520)等の炉心材料の研究開発が進められている。原子炉容器等の構造材料は、550~600℃の高温化を目指して高速炉構造用改良 316 鋼が開発されている。炭素の含有量(0.01~0.02%)を抑え、クリープ中における炭化物の析出を抑制し、代わりに固溶限の大きなチタン(N)を添加(0.07~0.10%)することやPの添加量を増加することでクリープ破断強度、延性を高めている。大気中試験, Na 中試験, 照射試験等が行わ

第1図 高速炉構造用改良 SUS 316 鋼と従来型 SUS 316, 304 鋼との腐食速度の比較

れて実証炉等への適用性について検討されている。Na 中環境効果試験では、腐食速度は従来とはほぼ同様であることがわかった。第1図に、従来型ステンレス鋼と Na 中の腐食速度を示す。

一体型蒸気発生器伝熱管材料として Mod. 9 Cr-1 Mo 鋼の開発が進められている。本材料は「もんじゅ」の蒸気発生器に使用された 2.25 Cr-1 Mo 鋼に比べて腐食速度が遅く、高温 Na 中での機械的強度特性も良好で実証炉への適用が検討されている。

長期的視野にたって科学技術庁の指導のもとに原子力用の材料開発が進められている。第2図に示すような極限環境材料、機能材料、解析評価法の開発や基盤整備が行われている。極限環境材料に関する開発では、高温化、耐放射線化、長寿命化を目標に、セラミックス、複合材料、金属水素化物等の研究開発が始まった。

第2図 フロンティア材料研究における研究課題

機能材料に関しては、原子炉内計装の高性能化、高精度化を目標に燃料温度、照射温度、荷重、中性子束等の測定用センサー機能材料の開発が始まった。解析評価法では、高速炉プラントの寿命延長および合理的な運転・保守・管理計画の策定に反映するために高速炉構造材料の寿命・余寿命診断法の開発が開始された。研究基盤の整備では、新材料設計および材料創製技術に役立てるとともに、関連する原子力プロジェクト開発にも波及させるため、1990年度に動燃・原研・金材研を電話回線で結ぶネットワーク方式材料データベースの整備が始まる。

2. Na 取扱技術

FBRの冷却材としての Na 取扱技術は、「常陽」の

運転・保守・補修経験により、数多くの知見を得ている。蒸気発生器は高温蒸気と液体 Na の取扱技術を含合わせもつ技術で、50 MW 蒸気発生器試験装置(動燃大洗工学センター)で技術習得がなされた。これらの技術経験を反映して「もんじゅ」の設計・建設および運転マニュアル作成に反映され、1991年5月からの総合機能試験や原子炉の運転に役立つ。

Na精製装置であるコールドトラップは、高捕獲率を目指して研究開発が進められて「もんじゅ」に適用された。大型FBRに対して、建設費低減化を目指してタンク挿入型コールドトラップの開発が進められ、実証データが得られつつある。第3図に、タンク挿入型コールドトラップの概念図を示す。

第3図 タンク挿入型コールドトラップの概念図

原子炉容器等の自由液面上には空気との接触を防ぐため不活性ガス(Ar等)で覆われている。カバーガス中には、Naの蒸気とミストが含まれ、上下の温度差等によりカバーガスが自然対流する。この自然対流によりNa蒸気/ミストが上部低温部に付着したり、構造物が変形したりする恐れがある。それゆえ、このカバーガスの自然対流挙動を解明(3次元汎用流体・構造解析コード)し、その対策(対流防止板の設置等)の研究が進められている。

Na燃焼研究では、酸素濃度の低いチッ素雰囲気中のプール燃焼時の挙動解明を進めている。低酸素時のNa燃焼速度、Naエアロゾルの発生量等を調べるため、酸素濃度を制御できるNa燃焼装置でプール燃焼させ、挙動解明するとともに解析コードの開発を行なっている。

放射性 Na の取扱技術に関しては、原子炉の冷却システムを模擬した試験装置により放射性腐食生成物(CP)の挙動を調べ、解析コードが開発されている。また、核分裂生成物(FP)の挙動は、燃料破損検出システム等の設計に反映するため、Na中の挙動、カバーガス中への放出挙動等の研究が進められている。

補修時の被曝線量を低減するため、遠隔操作技術の開発が進められている。機器の解体やNa洗浄を行うNa取扱ロボットが試作された。また、原子炉容器や配管の検査(ISI)をするため、200~250℃の雰囲気で使用できる高温用センサー(電磁超音波センサー、光ファイバーケーブル等)が開発されている。

原子炉冷却材としてのNa取扱技術習得は一応終了したと考えるが、今後は経済性追求の観点から高度化を推進する必要がある。

3. 計測技術

「もんじゅ」に使用される流量計や液面計等は、プラントに設置される前にNaによる実流校正試験が実施され、Na計測器の品質保証技術が確立された。大型FBRには、プラントシステムに適用できるコンパクトな計測器の開発や標準化を図る必要がある。

Na透視器の開発は、水平型と垂直型が開発され、原子炉内の異常を検出できる。Na透視器の原理はNa中で超音波を発信し、超音波が標的に反射して超音波受信機に戻るまでの時間を測定することにより、標的を画像化して内部状況を観察する。「もんじゅ」には水平型Na透視器が設置される。この超音波技術の応用例として、原子炉内の異常音や温度分布を検出する検出システムの開発が進められている。

レーザー技術の計装への応用として核励起レーザー型中性子検出器の研究が始められている。原理は、レーザー管に入射する中性子により発光するレーザー光の強度や位相、波長を測定することで中性子束を測定できる。炉心内の量子的状態(中性子)がレーザー光という光信号に伝達される。

「もんじゅ」の炉心部上部計装には、渦電流式流量計が設置される。この流量計は、小型で高温(~550℃)、高放射線下で使用される。大型FBRにおいても、この流量計や原理を応用した機械式ポンプのNaベアリングギャップの測定に利用できる。

4. 合理化研究

FBRの開発において最大の課題は建設費低減であろう。建設費低減方策として、配管短縮技術、2重管型蒸気発生器の開発、タンク内電磁ポンプ(Na浸漬型電磁ポンプ)の開発等幅広い研究開発が展開されている。

配管短縮技術には、配管ベローズ継手方式、機器浮動方式、9Cr系配管の採用、一体型機器の採用等の研究開発が進められている。配管ベローズ継手方式に関しては、ベローズ継手の適用法の検討が進められ、設計基準のドラフト等も作成されている。第4図に、配管ベローズ継手の概念図を示す。このベローズ継手技術の応用として、原子炉容器上部流入配管方式への適用の検討が進められている。

第4図 配管ベローズ継手の構造

高信頼性蒸気発生器として、2重管型蒸気発生器の研究開発が進められている。2重管型蒸気発生器は、伝熱管の外管-内管を密着圧着するか、間に金網線等を入れ、外管に設けた溝部または間隙部にHeガス等を流すようにしたものである。これにより万一、内管または外管が破損した場合には、直ちに検出して内管と外管の同時破損を防ぐ。高信頼性蒸気発生器が開発されれば、2次系削除システムの採用が可能となる。

高温用コイル等の開発により、タンク内電磁ポンプの適用が可能となり、小型電磁ポンプが試作され、Naでの実証試験が行われている。タンク内電磁ポンプが開発できれば、原子炉容器内や蒸気発生器内に電磁ポンプを挿入することにより、冷却系を合理化できる。

第5図に2重管型蒸気発生器の概念を示す。

5. NaK, フリーズシールメタル等の利用

FBRの開発当初、冷却材として予熱の必要ないHg (Clementine 炉)やNaK (ドンレー炉)が使用されたが、伝熱特性の良好なNaが適用されるようになった。しかしながら、崩壊熱除去系は異常時のみ作動する必要があるため、通常時予熱の必要のないNaKが適用される場合がある。

また、NaKはNa圧力計の作動流体として用いられる。第6図にその概念図を示す。NaとNaKはダイヤフラムで隔離され、高温Naの圧力をNaKは低温部に伝送する役目を果たしている。

伝熱管断面

第5図 2重管型蒸気発生器の概念

原子炉容器の上部に設置される回転プラグは、容器の蓋としての役目以外に放射線遮蔽、燃料交換の際の燃料交換機の移動等多くの機能を持っている。それゆえ、回転プラグは原子炉運転中は固定され、燃料交換中に可動される。原子炉容器と回転プラグのガスシール方法として、フリーズシールメタル(原子炉運転中は固化し、燃料交換時には溶融して回転プラグを作動する)が用いられることがある。「常陽」の場合には、Sn-Bi-In 3元合金(融点約85℃)が用いられている。

6. 革新技术

ANLでは新しいヒートパイプが開発されている。

第6図 Na 圧力計の概念

第7図がその構造で、Naプールに入れられた直管の中にHgがU字管型水/蒸気伝熱管へのヒートパイプ伝熱媒体として働くようになっている。これを適用することにより、プール型FBRの建設コストをある程度削減することが可能になるとしている。ヒートパイプの利用方法は、崩壊熱除去系やコールドトラップの除熱系に利用する方法が考えられる。

液体Liを原子炉の制御材として用いる方法が考えられる。Liのうち、 ${}^6\text{Li}$ は中性子吸収断面積が大きい。 ${}^6\text{Li}$ を濃縮して液体Liとして原子炉出力を制御すれば、制御棒駆動機構を不要にでき、原子炉構造を簡素化できる可能性がある。

Naが導電性流体であることを利用したフローカブラがある。フローカブラは、1次Naの液体慣性を磁力を介して2次Naに伝達し、ポンプ作用させる方法である。電中研が中心になってメーカー各社で研究開発が進められており、阪大ではNaKで基礎実験を行なって良好な結果を得ている。

第7図 ANLのHgヒートパイプ型蒸気発生器の構造

Ⅲ. 核融合炉

1. 磁場閉じ込め型核融合炉

液体金属は熱的性質が極めて優れた冷却材であって、高温・高出力密度の除熱が可能となる上、とりわけLiはD-T炉ではT増殖材を兼ねて系統や構造を簡素化できる利点がある。反面、強磁場下のMHD問題の解決が課題とされている。磁気閉じ込め型炉の場合、5~10Tの強磁場のため、流体が磁場を横切って流れるときに電磁誘導によって起電力が生じ、流体金属では大きな電流が流れる。これが電磁ブレーキとして働き、大きなMHD圧損(流動抵抗)が生じると懸念される。また、本来の乱流が電磁層流化して伝熱が劣化することもある。その他Li漏洩時の火災、LiからのT分離回収、構造材料のLiとの共存性等々の問題がある。したがって、我が国の国家計画を推進する立場の原研は Li_2O の増殖・He冷却路線を採っており、大学が主体となって、動力炉としての将来性に富む液体金属冷却の基礎研究を進めている。

数年前に米国エネルギー省(DOE)がまとめた報告書(BCSS, FINESSE)では、液体金属LiまたはLiPb冷却方式が最上位にランクされている(Pbは中性子増倍材)。これは動力炉では経済性を上げる必要があり、出力密度の高くできるLi冷却が魅力的なためである。ただし、MHD問題が不確定要素であって、解決すべき最重要課題であると指摘している。ブランケットの

出入口配管では、流路断面積が小さいので流速が比較的大きく($U=1\text{ m/s}$ 程度)なる上、超伝導コイルに近い強磁場($B=5\sim 10\text{ T}$)となるので、MHD 圧損は非常に厳しくなる。その対策としては、耐圧性のある金属管壁の内部が電気絶縁と液体金属との共存性を備えたような機能材料を開発することが最も現実的な解決策であろう。この方向での試行がすでに始まっており、圧損低減について有望な見通しを得ている。

一方、ブランケット内部では、磁場に垂直な流路断面積を広げて流路を下げる(0.1 m/s 以下)ことによって、MHD 圧損を充分低く抑えることが可能である。また、MHD 圧損が著しく低くなるように、磁場に平行な流路も採用できる。しかし、実際の設計では、複雑な流路形状や磁場配位のため MHD 圧損の評価は難しく、液体金属液の MHD 解析コードの開発とベンチマーク実験が今後の重要な研究課題となっている。

米国では先述の DOE 報告に基づいて、ANL で ALEX なる NaK ループで実験を開始し、同じく NaK ループで実験を始めた西独 KfK と共同研究を行い、我が国やソ連との協力も模索している。その他の各国も検討を始めている。我が国では、阪大、東工大、等を主体とする大学連合(科研費「核融合特別研究」のサブグループ)が早期に Li と NaK で MHD 圧損と伝熱実験に着手し、その基礎研究の成果を基に、すでに日米技術交流を行い、国際協力に備えている。

その他、日本の各大学では、液体金属の磁場中の沸騰などが研究されている。東北大学では MHD 圧損を回避するため Na ミスト冷却の基礎研究が行われている。また、国際的な共同作業が進行中の「DEMO 炉」に向けた実験計画で、その実験ポートを用いた液体金属 LiPb による冷却実験が検討されることになっている。

2. 慣性核融合炉

レーザー等の慣性核融合炉では、キャビティと呼ばれる球状の閉じた真空中間内、直径数 mm 程度の D-T 燃料球にレーザーやイオンビームをドライバーとして、核融合反応の短時間パルス出力を毎秒 1 回程度繰り返すことになる。D-T 反応では、発生エネルギーの大半は中性子が担い、キャビティを包むブランケット内で熱化して体積加熱する。しかし、約 $1/3\sim 1/4$ 程度は荷電粒子と電磁波が担い、キャビティとの境のブランケット第 1 壁に沈着して表面を加熱する。すなわち、数 $10\text{ }\mu\text{m}$ の薄い層で吸収され、 $1,000\sim 10,000^\circ\text{C}$ に達して蒸発する。これが毎秒繰り返されるので個体壁では耐えられない。したがって、蒸発してもすぐに凝縮によって再生できる液体金属 Li 流ブランケットを採

用するのが普通である。閉じた真空中間を球殻状に包む自由表面 Li ブランケット流をどのようにして形成するかが問題である。第 8 図に示す阪大レーザー研の慣性核融合炉の概念設計「千里 I 号炉」では、磁場に沿って Li を流す磁場ガイド流の概念を提唱し、超伝導コイルの端部の磁力線の拡がりとして NaK を使用した共同検証実験では有望な目途を得ている。本格的検証は今後の課題である。その他にも、流量制御、Li の蒸発、凝縮動特性、パルス加熱による圧力波発生と伝播等の研究課題がある。

第 8 図 阪大レーザー研「千里 I 号炉」の概念図
(磁場ガイド・Li 流ブランケット)

3. 加速器ターゲット

核融合炉を実現させるためには、材料の 14 MeV 中性子照射データを得る目的の強力中性子源発生装置が必要となる。米国の FMIT (Fusion Material Irradiation Test) 計画では、第 9 図に示すように、高速の Li 自由表面流に 35 MeV 、 0.1 A の陽子ビームを入射し、D-T 核反応に近いスペクトルの中性子束を得ようとしている。ターゲットそのものを Li 流とすることによって、 MW/cm^2 という驚異的な高熱負荷除去を可能にしている。HEDL の設計は、前後のノズルを入れて、ターゲット部を 17 m/s の片側自由表面の Li 高速流としてベルヌイの定理により圧力を下げ、ビームスポットを 10^{-6} Torr 程度の真空中に保っている。筆者らは、代替案として磁場ガイドや自己ピンチを用いて自己表面流の制御を提案している。残念ながら、FMIT 計画は資

第9図 FMIT加速器のLi流ターゲット

金不足で中止されたが、その必要性から、国際協力による再生や我が国の独自計画への取り込みが、原研を中心に検討されている。

Ⅳ. 宇宙用電源

熱機関では、熱サイクルにおける熱落差を確保するため、高温熱源と同時に低温除熱が必要となる。宇宙空間では、地上のように水または空気による冷却ができないので、高温での輻射(黒体輻射では800Kで2.3 W/cm²)が唯一の放熱の手段となる。また、宇宙用では機器・装置は軽量かつ小型で高出力密度が要求され、電源は100kW以上となると原子力発電が有利とされている。高温・高出力密度の要請から、冷却材や作動流入としては液体金属が用いられる。原子炉の冷却または輻射放熱器への熱輸送手段として注目されているのが、循環ポンプが不要なLiヒートパイプである。ヒートパイプは静的・受動的で、モジュール型で多数本用いるので冗長性があり、信頼度が高くなる。また、毛細管現象を循環力として用いるので無重力場でも機能することや、蒸発潜熱を利用するので軸方向の熱輸送能力が大きい利点がある。宇宙動力用の冷却材や熱媒としては、沸点が1,342℃と高く比熱や蒸発潜熱も大きいLiが望ましいが、Na, KやNaK等も検討されている。

実際に打ち上げられた液体金属冷却型原子炉使用のものは、米国NASAのSNAP-10 A(34kWt, U-ZrH 炉,

NaK 冷却, 543℃, 炉外熱電気発電)とソ連のコスモス衛星のトパーズ(150 kWt, UO₂ 燃料炉, NaK 冷却, 530℃, 炉内熱電子発電)がある。

SNAP-2, -8, -50等の偶数シリーズでは、NaKまたはLiで冷却し、HgまたはK蒸気タービン発電する先進的概念を検討し、地上実験を行なったが実現はしていない。最近の米国のSP-100計画では、もう少し現実的設計に戻して、1990年代中頃までに100kW(重さ3t以下)の宇宙発電システムを実現させることを目指している(第10図)。このため、発電方式は実績のある熱電気発電方式を採用し、SiGe 発電素子を800Kで70 m²に及ぶ円錐状表面に配列した放熱パネルに接合させている。そして、円錐頂部に位置する原子炉を120本のMo-13%Re製Liヒートパイプ群で冷却すると共に、発電素子まで熱輸送する設計となっている。Liの最高温度は1,500K、発電素子の運転温度は1,350Kで、効率は6.8%と見積られている。ヒートパイプの代替案としては、液体金属Li冷却で電磁ポンプ駆動方式も検討されている。その他、発電方式としてはLi-Heスターリングエンジン発電機や炉内式熱電子方式も検討されているようである。

宇宙用電源 SP-100 における Li ヒート

第10図 宇宙用電源SP-100におけるLiヒートパイプの利用

Ⅴ. 一般産業における利用

1. ヒートパイプ

ヒートパイプの概念は1940年頃出されたが、実用化したのは1963年ロスアラモスの宇宙飛行船用の熱電発電器としてであった。その後、熱交換器、電子装置の冷却や空調、エンジンの冷却、人工衛星の熱制御など広範な実用化が行われてきた。液体金属ヒートパイプは高温用として使われ、Na, K, Li など、いずれも作動流体として考えられている。

一般産業用としては、Naヒートパイプが工業技術院の重要技術研究補助金として開発された。Naヒートパ

イブの温度領域は450～600℃であり、各種産業における熱エネルギーの有効利用をねらったものである。

第11図は、ピアノ線の製造行程に用いられたワイヤパテンチング炉へNaヒートパイプ熱交換器の設置状況を示す。西独Hereaus社では、ISOPIPE「イソパイプ」という名称の圧力制御式高温ヒートパイプ均熱炉を商品化している。この炉では450～1,065℃の温度範囲の制御を効率よくできるとしている。

第11図 廃ガスからの熱回収用Naヒートパイプ利用の熱交換器

Naヒートパイプは、パイプへNaを封じ込める際の酸素などの不純物の混入に関連して、パイプ内面材の腐食による寿命がカギと考えられ、その研究も行われている。

2. 太陽熱利用

太陽熱は低密度であるため、それを利用するとき、できるだけそれを集めて熱媒体に熱を伝えた方が効率よくシステムを構成することができる。このような考えからGE社では集光器で集めた太陽熱をNaに伝え、Naを循環させることにより、2次の熱利用系へエネルギーを輸送するシステムが考えられ実験が行われた。結果は良好であったと報告されているが、その後実用されたかどうかは不明である。

イスラエルでは、フロンを作動流体としてHgを加熱したMHD発電システムを使用し、砂漠での太陽熱発電を行うための基礎実験を行なっている。

3. タービン

新鋭火力発電の蒸気温度は538℃、効率42%程度であるのに対して、原子力発電では280℃、32%程度である。この効率を大幅に増加させる方法として、水蒸気サイクルの高温側に液体金属蒸気を用いる2重ランキンサイクルがある。米国では1930年代にHgを用いた2重サイクルにより、当時としては非常に高い発電効率を達成している。しかし、Hg蒸気によるタービン翼の腐食が障害となり、Hgの生産量の制約や毒性

の問題もあってか、数基に留まった。近年では、K蒸気タービン2重サイクルがORNLやLLLから提案され、830～1,000℃で50～60%の総合効率を目指している。筆者の一人も磁場中でK沸騰を試み良好な結果を得ている。最大の問題は翼の腐食であろうが、新材料の研究の発展次第では解決の可能性が期待できよう。発電効率の大幅上昇は経済効果が大きいので、まず火力との組合せを狙って挑戦するのが賢明であろう。

4. MHD発電

液体金属MHD発電は、可動部分を持たず、高い信頼性を有し、タービン翼腐食の問題を避ける方法として研究されてきた。電気伝導度は極めて高く、高い出力密度が期待できる。筆者らの評価では、液体の運動エネルギーを電気に変換するMHD発電自体については、良好な結果が得られそうであるが、液体加速、すなわち熱から運動エネルギーへの変換効率が今後の課題である。しかし、近年の超伝導磁場技術の著しい進展により、MHD発電を再評価する傾向がある。二相流再生サイクルにより高効率化できるという報告もあり、今後の研究の展開が期待される。宇宙用や太陽エネルギー利用のように、在来火力に比して必ずしも効率が高くなくてもよい場合は話が違って来る。宇宙用ではMHD発電の特徴が活かせる。イスラエルでは、砂漠での太陽熱利用のために、フロン-Hgを作動流体とするMHD発電の基礎研究を行なっている。筆者の一人も、目的や作動流体を替えて同様の実験を検討している。

Na冷却高速炉と液体金属MHDを結合するシステムも検討されている。第12図はANLから提案されたプラントで、FBRの3次系にSnを使い、Sn-水熱交換器により加熱された蒸気と二相流を作りMHD発電部に導いている。

第12図 LMFBR/MHDサイクル(ANL)

5. 電池

最近、高性能新型電池として液体金属を使うものが

注目されている。その代表的なものは、電気自動車や電力貯蔵用に開発が進んでいるNaS電池である。これは陰極に熔融Na、陽極に熔融Sと多硫化Na、電解質に β アルミナを使うもので、350℃程度で使われる。 β アルミナは筆者の一人がNa蒸気圧検出器の開発に使用した経験があるが、第13図のように、 β アルミナ電解質の両側のNa蒸気圧の差でイオン電流が流れるものである。この電池はエネルギー密度がPb電池の4倍以上、充放電の副作用が全くない、など優れた特性を有している。1989年カナダで開かれた「国際電動車両シンポジウム」でも、この電池を搭載した試作車の発表が幾つかあり、2～3年後に実用化されるとされた。

第13図 Na蒸気圧差により β アルミナ内に発生する起電力

NaS電池は電力貯蔵用にも考えられていて、本'90年度からNEDO(新エネルギー総合開発機構)が大規模電力貯蔵システムの実証試験を行うことになっている。第14図はNaS電池の構造例である。

Liを使った電池の開発も進められているが、NaS電池に比べてより基礎的な段階にある。これには常温型のLi/硫化モリブデン電池と高温型のLi合金/硫化鉄電池がある。今後の発展が期待される。

6. 鉄鋼・冶金, その他

熔融したアルミニウム(Al)や亜鉛(Zn)から鋳物やインゴットを作る過程に液体Al/Zn(溶湯)を圧送するプロセスがあり、そこに液体Na用に開発されてきた技術により製作された電磁ポンプや電磁流量計が使われた実績がある。液体Naより液体AlやZnの方が構造物に対する腐食性が強いので、耐食性、耐熱性に優れたSiCなどのセラミックでダクトをつくる試みもある。

熔融した鉄鋼やその他各種金属を電磁流体的に制御することにより、従来できなかった精巧なプロセスが可能になるため、最近この分野は鉄鋼工学の関係者に

第14図 NaS電池の構造例

も特に注目され、この電磁流体力学の冶金工学への応用に関する国際会議が開かれたり、先端の工学分野として活発な活動がされつつある。鉄鋼協会では、特定基礎研究会に材料電磁プロセッシング部会を設け、電磁場による熔融金属や半導体の加熱・浮上・移送・成形など、液体金属MHD技術の連続鋳造過程への応用のための基礎研究が行われている。特に、Cold Crucibleといわれる技術は、レビテーション技術とも呼ばれ、高周波によりルツボ壁と無接触で溶解・浮上保持させる高純度または高温精錬技術として注目に値する。日本では無論、フランスのMADYAM、ソ連リガの物理研など世界的にも研究されている。

鉄鋼の薄板を連続的に焼鈍するプロセスは、ガスによる加熱・冷却を行うため非常に大きな装置になり、相当のエネルギーが消費される。このプロセスを液体Na中に直接鋼板をはしらせる方法で行わせる試みが、約30年前米国で行われた。筆者の一人も概念設計を行なったが、従来の装置に比べて格段に小型の装置になり、エネルギー消費も少なくてできるが、課題はNa技術になじみのない業界がそれを受け入れるかどうかであろう。

Naは電気伝導度が、Ag, Cu, Au, Alについて5番目の順位であるが、比重はCuに比べて小さく、素材

としての単価が比較的安価であるため、適当なチューブに入れることにより、経済的な電力ケーブルを作ることができる。米国では送電に実際使用された Na ケーブルがつくれられ、特に安全上などの不都合があったとは報告されていない。この他、Na はエンジンの弁棒の中に入れて放熱をよくしたり、海水との反応により発生する水素により深海の物体を浮上させたり、各種の利用が考えられているので、今後の発展を期待したい。

Ⅶ. おわりに

原子力は先進型エネルギーの旗手と放射線利用をスローガンに、種々の先端技術を集約的に総合する重点領域・分野として、人材・資金・情報・材料等を集積して発展し、学問的にも複合領域として多岐にわたる総合

的な波及効果が期待され、またそれに応じてきた。しかし、コンピュータ、エレクトロニクス、レーザー、超伝導、新素材、人工知能等々、かつては原子力をその成長過程の温床とし、また原子力の先端部分を支えてきた領域が、最近になって独自に急成長を遂げている。その分、原子力のハイテク・イメージが低下し、巨大科学としての原子力が果たしてきた先端技術の温床および集積地としての役割は、宇宙や生物等の科学・工学にも移行・分散しつつある。

一方、原子力発電の実用化が進む中で、原子力分野が研究開発においてその活力を維持し、さらに発展するためには、関連性の深い先端技術を意識的かつ積極的に取り込んで、再活性化を図る努力が必要であろう。また、宇宙・加速器・生物など他の巨大科学との共棲も肝要である。

日本原子力研究所

◇第18回原子力安全性研究成果報告会◇

日時 10月17日(水) 13:30~17:00

場所 経団連ホール(経団連会館14階)

○プログラム○

あいさつ 副理事長 更田豊治郎
原子力安全性研究の概要 東海研副所長; 安全性試験研究センター長 松浦洋次郎
反応度事故時の照射済燃料のふるまい 燃料安全工学部反応度安全研究室長 藤城俊夫
JMTRにおけるBWR燃料出力急昇試験の現状 材料試験炉部照射第1課長 市橋芳徳
緊急時技術助言のための計算機システムの開発 原子力安全データ調査解析室主任研究員 小林健介
放射性核種に対する土壌のバリア効果試験 環境安全研究部浅地処分研究室長 神山秀雄
(特別講演) 放射線安全の現在の考え方

ICRP会長 D. Beninson

(司会) 実用燃料試験室次長 石本 清

○配布資料 ①講演要旨集(プログラム付)

②パンフレット「原子力安全性研究の現状(平成2年)」

③原子力安全性研究「用語集」

○会場ロビーに「原子力安全性研究」に関するパネルを展示。

来聴歓迎

問合せ先 東海研・安全性試験センター (0292-82-5270)

◇第13回放射線利用研究成果報告会◇

日時 10月25日(木) 13:30~16:40

場所 経団連会館国際会議場

○プログラム○

あいさつ 副理事長 更田豊治郎
放射線利用研究開発の概要 高崎研所長 町 末男
放射線による超耐熱炭化ケイ素繊維の開発 高崎研第4開発室長 瀬口忠男
連続気泡型ポリエチレンフォームの難燃化 高崎研大阪支所長 畑田元義
がん治療用密封小線源の開発 東海研究所アイソトープ部製造課長代理 加藤 久
(特別講演) 核医学・生物学におけるサイクロトロン
の利用現状と展望 東大・医 佐々木康人
(司会) 高崎研管理部長 横川 薫

来聴歓迎

問合せ先 高崎研・管理部研究業務課 (0273-46-1211)

東海研・アイソトープ部 (0292-82-5785)

○原研 RI・原子炉研修所・研修生募集○

○第21回核燃料工学短期講座

目的 原子炉燃料に関する全般的な知識を比較的短期間に習得、理解させる。

授業レベル 大学理工系卒業者、および工業高校を卒業し核燃料取扱実務経験4年以上の者。

期間 11月5日(月)~21日(水)

受講料 52,530円(消費税を含む) (定員 24名)

締切 9月25日(火)

申込先 原研 RI・原子炉研修所 (0292-82-5667)