



研究室紹介

原子力工学科第一講座（原子炉工学）

宮崎慶次*

1. はじめに

講座の看板は「原子炉工学」であり、内容は核分裂、核融合を問わず核エネルギー発生・変換システムとしての原子炉工学的諸問題の中から、特に重要な安全性、冷却・熱輸送系、新型エネルギー変換などの課題と取り組んでいる。学科創設者で我国初代原子力安全委員長の故吹田徳雄先生からの伝統を受け継ぎ、進取的精神を尊重する気風を保ち、多彩で先進的課題に好んで取り組むように努めている。

学問的には電気・機械工学的な性格が強い。特に、液体金属の電磁流体力学(MHD: Magneto-Hydro-Dynamics)及び熱工学に関する総合的な実験と理論的研究、並びに、そのエネルギー工学への応用に特色があり、この面での研究実績及び設備(原子動力実験装置)では世界的水準にあると自負している。大学としては比較的大型の装置を動かすためにはチームワークが必要で、皆で酒を飲んだり、スポーツ、旅行などなるべく一緒に遊ぶことを心がけている。

2. 原子炉の工学的安全性

原子力発電が当面する最重要課題は、より一層の信頼性と安全性の向上である。電力やメーカーは深層防護(Defense-in-Depth)における前段たる予防保全に力を入れ、原研や動燃など国の研究機関では後段とも言うべき設計基準事故、例えば、冷却材喪失事故とその対応設備としての炉心冷却設備(ECCS)などの安全研究

を行っている。我々は大学の社会的使命を考慮して、更に後段である炉心溶融のような苛酷事故に伴う現象を取り扱っている。これは発生確率は極めて希少でも、重大な結果を招く潜在的可能性のある事象には、予め考慮を払うという深層防護の安全思想に基づいている。

具体的な研究課題は、ナトリウム(Na)やカリウム(K)など液体金属の沸騰、液体金属の膜沸騰、事故後崩壊熱除去としてのデブリベッドの冷却性、蒸気爆発などを順次扱ってきた。一般研究(A)を3回、(B)を1回、現在は重点領域研究などの科研費で研究をしている。

一般に、液体金属は高熱伝導度で温度分布が一様化し、沸騰は大きな過熱度を伴う突沸現象となり易いので、そこから着手した。次に、炉心が崩壊して燃料がデブリとなってベッドを形成した状態での除熱可能限界を調べるため、水入り円筒ガラス容器中にベアリング用の細かい鋼球や鋼円柱ベッドを作り、高周波誘導加熱で放射能残留熱を模擬して実験した。底部から水が対流で流入できる状況では、限界熱流束が大幅に増大するなどの貴重な知見を得た。最近では蒸気爆発に力をいれており、衝撃波管型試験部の底部に錫やアルミの高温の熔融金属プールを形成し、上部から水柱を膜破断で落下させ、熱的相互作用に伴う圧力波および水柱の上昇速度と高さを測定し、蓄積熱から機械的破壊エネルギーへの転換率を評価している。

このような知見に基づいて、原子力の安全問題に中立機関としての積極的機能を果している。

3. 高速増殖炉(FBR)の高機能化

本稿が活字となる頃には我国の高速増殖炉の原型炉「もんじゅ」の臨界が新聞紙上を賑わしている筈である。連鎖反応の余剰中性子をU-



*Keiji MIYAZAKI
1937年3月18日生
1960年大阪大学工学部電気工学科卒業、1966年原子核工学修士
現在、大阪大学工学部原子力工学科教授

を稼ぐためヘリカルコイルとなるので、特殊な形状での伝熱特性実験を行っている。また、中間熱媒を何にするのかも研究の対象で、熱物性が優れ、500～550℃の高温で使用出来て、水ともNaとも反応しないものが最も望ましい。今のところ水模擬伝熱実験で興味ある結果を得ており、電力やメーカーからも強い関心と支援が寄せられている。

液体金属技術の高温・高効率・高機能のエネルギー機器開発を狙った研究も着手している。

4. 液体金属の電磁流体力学(MHD)と核融合炉冷却への応用

現在考えられている核融合は重水素(D)と三重水素(T)即ちトリチウムを核融合させるD-T反応である。資源的には海水中に存在する重水から燃料がとれるD-D反応が望ましいが、プラズマ温度を1桁近く上げる必要があり、D-T反応に重点が置かれている。しかし、三重水素は天然には存在しないので、D-T反応で発生する14MeVの中性子を炉心プラズマを囲むブランケット中のLi(リチウム)に当てて三重水素を再生産する。この過程をトリチウム増殖と呼んでいる。D-T反応では、出力の80%は中性子エネルギーで、これを熱化して発電に供するための熱エネルギーを取り出すのもブランケットの役割である。

どうせLiを使うのであれば、それをトリチウム増殖材と冷却材として兼用させるのが自己冷却と呼ばれる液体金属Li冷却である。これに対して、Li₂Oなど固体増殖材とHeガス冷却または水冷却を組み合わせる方式が原研などで考えられている。最も先行しているトカマク型炉ではブランケットの外側に高価な超伝導コイルが配置される。従って、核融合発電炉が経済性を持つには、高出力密度なブランケットと高温・高効率のエネルギー変換システムが要請される。その観点で、液体金属冷却の将来性が見込まれているが、最大の課題は高温プラズマの磁気閉じ込め用の強磁界中での電磁流体力学的(MHD)圧力損失である。

筆者達は、熱電直接エネルギー変換の研究の一環として、古くから既存のNaK液体金属

MHD実験装置で発電実験を行ってきた。しかし、熱サイクル効率を評価すると、二相流ノズルや凝縮インジェクターなどでの流体加速効率が良くないため、安全性最優先や高温材料の制約から原子力用としては有望とはいえず、宇宙用など特殊な用途に限られることが分かってきた。折しも、1970年代に入って、核融合もプラズマ研究だけでなく、国際会議において発電炉の概念設計が示され、核融合炉工学が重視され始めた。筆者達も、核融合炉での先進的エネルギー変換の基礎研究として、金属カリウムの磁界中の沸騰から着手した。

1980年代に入って、10年間にわたる科研費「核融合特別研究」が始まり、筆者も最初の6年間は公募の形で毎年継続して認められ、後の3年間は計画研究の代表者として「核融合炉の液体金属冷却のためのMHD研究」を続ける機会が与えられた。学生達と教職員の献身的な努力のお陰で、手作りのNaKとLiの実験ループを製作し、実験と理論の両面で多くの成果を得ることが出来た。種々の形状の試験部に垂直磁界と超伝導平行磁界を用いて圧力損失と伝熱の実験データを世界に発表している。特に、矩形冷却管で、プラズマ対向壁を想定した一面だけを残して他の三面を電気絶縁すれば、四面全部を絶縁したのと同様のMHD圧力損失の低減効果が得られることを理論と実験で示した点は評価されているようだ。

米国エネルギー省(DOE)が纏めた冷却方式の比較選択研究では、MHD問題が鍵であるとしながらも、液体金属冷却方式が最上位にランクされた。これを受けて、国際核融合実験炉(ITER)でも、液体金属冷却試験を一部採り入れる計画が進んでいる。筆者は、米国アルゴンヌ、独のカールスルーエ、露のエフレモフなどの研究所と個別の交流を行っているが、追風の中で今後は緊密な協力も検討している。

レーザー核融合などの慣性閉じ込め方式でも、キャビティと呼ばれる中心真空部で核融合反応を起こし、その周りにLiの自由表面流でブランケットを形成する炉概念が示されている。核融合ショットで瞬間的に壁が高温になり蒸発するので、液体金属で常に冷却凝縮で再生して、

材料的な問題の解決を図ろうとしている。阪大レーザー研では磁界でLi流を制御する概念を提案し、筆者達がNaK実験で検証した。

また、核融合炉材料研究用の超強力中性子源として、真空中のLi自由表面流ターゲットに35 MeVで0.1Aの重陽子ビームを打ち込んで14 MeVの中性子を発生させるFMIT計画があった。米国が財政難で挫折したのを引き継ぐ形で、原研が主体となって国際協力でESNIT計画として再生を計画しており、筆者もターゲット部の検討と基礎実験で参加している。真空中の自由表面流は学問的にも興味ある課題であり、そこへ磁界をかけるとな面白い。

5. 宇宙用原子力発電炉と無重力環境利用

宇宙用の熱機関では、放熱は輻射に頼るので、高温冷却材としては、沸点が1342℃と高く比重が0.5と軽量のLiが有望視されている。また、筆者達の高温ヒートパイプの研究成果の応用もある。しかし、我国の宇宙計画には未だないので、先ず、無重力環境下での沸騰などの研究から着手している。数年前に、5年がかりで三菱重工と共同で、航空機の放物線飛行で得られる20秒間程度の微小重力場を利用して、水の沸騰二相流実験をした。細かい蒸気泡が合体して巨大バブルに成長する様子が観測できた。

強いて原子力と関連付ければ、国の機関の原子力発電技術機構で燃料集合体の最大熱負荷と管群ボイド試験をする委員会の主査をしており、中味が見えるし、重力の影響は参考になると言えなくもない。だが、やはり、「もの好きの遊び心」が本根である。一昨年11月に毛利さんの宇宙遊泳からの帰還に合わせて、朝日新聞が西日本の夕刊の一面にカラーで載せてくれた。一生懸命やっている原子力や液体金属MHDの研究でないのは複雑な思いだが、本職の方はがんばって当たり前なのだとも思う。

6. おわりに

これらの研究は、昭和42～44年度に原子動力実験装置の名称で設置された液体金属実験装置によるものが骨子となっている。講座の初代教授の故吹田徳雄先生のご努力の賜物であり、

実際の装置の建設、運用と研究の推進は、当時の助教授の藤家洋一先生（現東京工大原子炉工学研究所長）と助手の小生、井上正二教務職員、山岡信夫技官、それに歴代の多数の学生が協力し、小生が助教授で実質の指導者となった十数年前から現在の研究の枠組みが定着した。

初期には高圧ガスが設備があったり、多量のNa, K, Liと言った危険物を抱え、消防署の監督を受ける一方、時には技術的指導する関係を保ちつつ、学生ともども「世界の第一線の仕事」と言う意識に支えられて、何とか泥臭い仕事をこなしてきた。だが、残念にも、吹田先生退官後の十数年に亙る教授不在で概算要求が出来ないままに年を経て、現在は、維持費が半額から更に減額、全額削除も近い状況にある。第一講座のもう一つの大型装置で田辺哲朗助教授に任せている加速器実験装置も同様である。

「Scrap & Build」が文部省の基本方針であり、外国や他大学の評価はともかく、学内的には極めて激しい状況を承知しつつも、新規の概算要求を続けている。昨年には、卒業生で原研にて国家プロジェクトの核融合実験炉JT-60改造のリーダー的役割をしてきた堀池寛助教授を迎え、また、周辺との協力の基に、新たな展開を期待している。図は小生の原案に彼の構想を加味して図形化したものである。液体金属と言う特殊性ゆえにユニークで将来性に富んだ研究が出来ると思う。しかし、計算機や加速器と違って共通性や共同利用では難しい面もあるが、その点は、超伝導磁石、イオンビーム、超高熱負荷などでカバー出来ると考えている。

原子力は今、マスコミに叩かれ逆風の中にあるが、社会的重要性は増し、原子力産業界は順調に成長、大学への期待も高まっている。放射線や液体金属などを扱う大型設備で研究することは、ソフト志向の若者にはトレンドでないことは承知の上で安易に迎合せず、信念をもって頑張らなくてはと思う。大学の原子力教育と研究を空洞化させない意味でも、折りしも、大学改革の嵐で、東京大学が学科と専攻の名称を「システム量子工学」と変更するご時勢だからこそ、大阪大学だけでも名実共に「原子力工学」で頑張るのも我々の見識である。