北海道大学におけるエネルギー環境教育と人材育成*

(原子力とエネルギー利用分野の低炭素化推進技術者教育)

Education of Energy and Environment Engineers in Hokkaido University
(Education for Nuclear and Energy Utilization for Low-carbon society)

奈良林 直**

NARABAYASHI Tadashi

Abstract The Division of Energy and Environmental Systems in Hokkaido University is chasing energy systems contributing to sustain the global environment, such as next-generation nuclear reactor systems, nuclear safety, nuclear fuel cycles, nuclear wastes management, hydrogen fuel cells, advanced engine systems, and fluid energy systems. In these technologies, there exists common science and technology field, that is to say the multiphase flow. The filed of energy and environmental systems are very important not only for human beings but also for all the life on this planet, the Erath. Education and study of nuclear and energy engineering in this division has proved to be quite attractive for students and researchers on the view point of multiphase flow.

Keywords: Energy utilization, Environment, Low-carbon society, Multiphase flow, Nuclear reactor, Fuel cycle, Hydrogen fuel cells, Advanced engine system, Fluid energy system

1. 緒 言

北海道は冬季のエネルギー需要が大きく、1世帯当たりの灯油消費量が全国平均の約3倍に上る。このため、低炭素化社会を推進するとともに、化石燃料への依存度を下げ、石油価格の高騰の影響を受けにくくする必要がある。冬季のエネルギー需要が大きい一例であるが、毎年の札幌市の除雪費用は約180億円に達する。札幌市の人口は約180万人であるので、1人当たり1万円のコストを税金から支払っていることになる。冬季の雇用に貢献しているものの、人件費を除く除雪費用の内容は運搬、融雪、排雪に用いる化石燃料費である。Fig. 1は降雪時の朝の北大のキャンパス、Fig. 2はJR札幌駅とJRタワー、Fig. 3はJRタワー地下に設置された北海道熱供給公社のコージェネ設備である。札幌駅周辺のショッピングセンター

やホテル、デパート、オフィスビルに電気と熱が供給されている。ヒートポンプによるオール電化マンションが普及し始めているが、冬季の極寒時期での能力低下などのため、一般家庭の暖房の主力は依然として石油ストーブである。

Fig. 1 Hokkaido University in a snowy morning.

* 2010.11.21 受付

** 北海道大学大学院 工学研究院 エネルギー環境システム部門 〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目
TEL: (011)706-6682 FAX: (011)706-6682 E-mail: tnaraba@eng.hokudai.ac.jp

近年、世界各地で見られる異常気象などを背景とした低炭素化社会実現への機運が盛り上がるなかで、各家庭の省エネルギーを推進すると共に、クリーンなエネルギーである原子力の有効利用を更に進展させる必要がある。とりわけ、我が国に於いては気候学分類上の「北方圏」に属する北海道が先頭に立ってこの困難を克服し、エネルギー政策のモデル地区となるべきであると考え。

2. エネルギー環境教育の重要性

2.1 最近 20 年間のわが国の状況

Fig. 4 は世界の 1 次エネルギー供給の推移を示

Fig. 2 JR Sapporo station and JR Tower.

Fig. 3 Cogeneration facility in JR Tower's basement.

Fig. 4 Share of world's primary energy consumption.

す。地球規模での低炭素化社会の実現には 1 次エネルギー供給の約 9 割を占める化石燃料の効率的利用の推進と、CO₂ を発生しない発電の普及が必要である。原子力発電反対の急先鋒であったグリーンピースの創始者は、「原子力は再生エネルギーと組み合わせて使うべきである。原子力発電は唯一の実際的で安全な環境にフレンドリーなエネルギー源である」と米国下院のエネルギーと資源に関する小委員会にて証言した[1]。我が国では Fig. 5、Fig. 6 に示す通り、一般家庭および運輸部門の CO₂ 排出量の増加が著しく、マイカー、冷暖房、給湯が大半を占める。このことは、精神的なエコ活動の限界を示しており、技術的・経済的あるいは政策による解決が必須である。

Fig. 5 CO₂ emissions from home including car[2].

Fig. 6 CO₂ emissions from home use[2].

2.2 原子力による熱供給と低炭素化発電の推進

北海道と同様に「北方圏」に属し、山岳部に降雪の多いスイスでは、既に 20 年以上にも亘り、原子力発電所の低圧タービン抽気蒸気を熱源とし、総延長が 130km に達する給湯配管を用いて 2300 世帯を超える多くの家庭に供給されている。たった 40 世帯の小さな村にも給湯パイプラインが敷設され、全室床暖房の家屋で豊かな暮らしをしている[3-4]。

一方、欧州では燃費規制が強化され、CO₂ 排出

Fig. 7 Electricity share in Switzerland (IAEA, 2002).

Fig. 8 Beznau NPP in Switzerland [3].

Fig. 9 Hot water pipelines from the Beznau NPP[4].

をよほど低減しないとわが国の自動車は輸出できなくなる。欧州では熱効率の高いディーゼルエンジン車が乗用車の主流を占めるようになってきており、電気自動車普及のための電気スタンドの設置も開始されている。

経済発展の著しい中国でも大気汚染の深刻化に伴い、安価な電気自動車の普及が始まっているが、効率の低い火力発電所の電気では国全体でのCO₂の排出は減らない。2010年に中国のCO₂排出量は米国を抜き、世界一となった。原子力発電

所の建設も急ピッチで開始されたが、日本並みの発電シェアになるには100基以上の原子力発電所の建設が必要であり、発電所の品質保証や優秀な人材確保の面で容易ではない。

このように、低炭素化社会の実現には、発電の高効率化とCO₂を排出しない再生エネルギーや原子力発電の推進が必要である。後者は特に安全性の確保と核不拡散やテロ対策などのセキュリティの確保も必要である。

我が国においても、マイカーや冷暖房、給湯を含む一般家庭の低炭素化の推進が必要である。特に北海道では石油価格の高騰に対して無防備であるが、エネルギー供給側の電力会社やガス会社の低炭素化と需要側の各家庭でのヒートポンプ、プラグインハイブリッドや電気自動車の普及により、低炭素化が推進される。北海道電力では泊3号機の運転開始により Fig. 10 に示す通り、1990年比で20%のCO₂排出低減となった[5]。

Fig. 10 CO₂ emissions from HEPCO's power plants.

2.3 原子カルネッサンス

原子カルネッサンスはフィンランドのオルキオト3号機から開始された。最新鋭の欧州型加圧型原子炉(EPR)の初号機が建設中である。続いて

Fig. 11 NPP construction plans in the world.

イギリス、米国、中国、インド、ロシア、ベトナム、アラブ首長国連邦など多くの国で原子力発電所の建設が計画された。Fig. 11 に世界各国の原子力発電所の建設計画の集計結果を示す。中国の三面 (Sanmen) では既に AP1000 の建設が開始されている。Fig. 12 はサウジアラビアのキング・アブドゥルアジス大学と北海道大学との学術交流協定締結に関して両大学の幹部が合意した際の記念写真である。サウジアラビアでは近い将来の油田の枯渇に備え、石油資源の温存と石油を輸出できる間に原子力発電所と造水プラントの建設する方針と打ち出し、原子力教育、水圏研究(G-COE)、口蹄疫研究に実績のある北海道大学に協力を要請してきた。Fig. 13 に示すとおり、サウジアラビアは我が国が輸入する原油の 28% を占める。サウジアラビアにとって日本は米国に次いで世界で 2 番目の原油の輸出先である。我が国のエネルギー自給率はわずか 4% である。両国の関係はもっと親密になってよいのではないかと考える。現在の世界人口は約 70 億人。2050 年には 100 億人に達すると予測されている。中国、インドをはじめ経済発展が著しい国々のエネルギー消費は増大している。世界的

Fig. 12 Meeting with King Abdulaziz Univ. and Hokkaido Univ. for Agreement on Academic Exchange.

Fig. 13 Japanese fossil fuel imports by country.

にエネルギー資源が逼迫しつつあるなかで、我が国のエネルギー、世界のエネルギーと地球環境保全を維持していくために、エネルギーと地球環境に取り組む技術者育成教育が必要である。

北海道大学大学院工学研究院エネルギー環境システム部門は、科学技術基本計画の重点分野であるエネルギー分野に対応するため、将来型低炭素化エネルギー社会形成のための基盤となるエネルギー生産・貯蔵・利用システムにかかわる人材を育成することを目的・理念とする。具体的には、原子力エネルギーや自然エネルギーをベースとした高効率発電、水素製造・貯蔵技術、高性能燃料電池、高度石油利用技術、原子力の安全性や燃料サイクルと高レベル廃棄物の処理・処分およびそれらに必要な計測・制御技術に関する領域において、独創的なリーダーシップを発揮できる人材の育成を行っている[6]。以下、部門に所属する 6 研究室の混相流関連研究と研究技術者教育について紹介する。

3. エネルギー環境システム部門の混相流研究

3.1 原子炉工学研究室 (奈良林直教授)

次世代原子炉設計、原子炉核特性の解析・評価・最適化、原子力の高度多目的利用、超長期サイクル炉心の燃料構成、炉心や機器の状態監視・原子力プラント(NPP)の信頼性向上に関する保全技術、神経知能系を有する高度原子力保全システムの開発研究などを行っている。これらの研究テーマのなかで、混相流に関係しているのが、液滴衝撃エロージョン(LDIE)による配管減肉に関する研究である。原子力発電所の蒸気が流れる配管のなかで、復水器に接続されるドレン管やベント配管のオリフィスの下流やエルボ部で、Fig. 14

Fig. 14 Principle of LDIE and examples in NPPs.

に示すように高速蒸気中の液滴が配管内壁に衝突して金属を削っていく現象である。溝が次第に深くなり配管壁を貫通してピンホールを開ける。小さな蒸気リークであっても点検のために原子力発電所（NPP）を長期に停止することもある。100 万 kW 級の NPP が 1 日停止すると代替として火力発電所を運転するが、その燃料代は約 2 億円、1 ヶ月で 60 億円となり、電力会社の予定外の経営損失となる。このため、この事象の発生箇所を予測して補修することは NPP の安定運転や信頼性向上にとって重要である。この原因を解明するため、Fig. 15 に示す高速回転円盤 LDIE 試験装置を製作し、アルミや炭素鋼、ステンレス鋼試験片の側面にノズルから落下させた液滴が数百万回以上衝突すると金属組織が金属疲労により剥離して、次第に溝が深くなっていくことがデジタル顕微鏡によって測定された。気液二相流により金属壁が削られる、固気液三相にまたがる事象である。

Fig. 15 LDIE experimental test facility using a disc and an example of a SUS304 test result.

3.2 原子力安全工学研究室（杉山憲一郎教授）

原子炉熱流動現象実験と解析評価を基盤研究分野とし、沸騰水型原子炉（BWR）の限界出力や核沸騰から膜沸騰への沸騰遷移（BT）原子力システムの安全性解析、軽水炉と高速炉のシビアアクシデントに関する研究を行っている。沸騰・凝縮伝熱と高温熔融物・冷却材の相互作用メカニズムとその評価、Na-水反応・Na 燃焼の評価、原子炉の炉心の限界熱流束や沸騰遷移の研究を行

っている。Fig. 16 はプール沸騰中の白金線表面の膜沸騰と焼損（Burnout）現象を捉えた高速ビデオ映像と液体金属ナトリウムのぬれ性を測定するための表面張力により形成された接触角を測定している写真、Fig. 17 は液体ナトリウム中を落下する熔融金属の破碎機構を調べる実験装置と、その実験結果を示す高速ビデオ画像である。これらの現象は気液二相流、異種の液体金属の二相流に関する研究である。これらの卒論、修論に取り組む学生は、沸騰現象や液体金属ナトリウムを使うことを体験することにより、軽水炉や高速増殖炉の安全性や事故時の挙動に関する研究者としての人材育成教育を受けていることになる。

Fig. 16 Burnout phenomena and a sodium droplet.

Fig.17 Melted fuel drop fall down onto liquid sodium.

3.3 原子力環境材料学研究室（佐藤正知教授）

原子力発電に伴い発生する高レベル放射性廃棄物や超ウラン元素（TRU）の廃棄物の地層処分に関する安全研究を推進するため、ガラス固化体、ベントナイト、セメント材料および金属材料の長期特性評価に関する研究を行っている。高速炉への移行期に向けて、処分研究の立場から核燃料サイクルの高度化に関する研究を進めている。地球の環境保全上、原子力の利用は数少ない現実的な選択肢の一つであるが、放射性廃棄物の発生は不可避で、これを安全に人間や生物の生活環境圏から隔離しなければならない。20 世紀型の"ものづ

くり"社会ではせいぜい 100 年程度先までしか考えない取り組みであったが、高レベル廃棄物の処分場を建設し処分を実施に移すには、数千年を超える長期の環境影響評価とそれを可能とする環境材料の開発を進める必要がある。高レベル放射性廃棄物は、放射性物質をガラス成分とともに高温で溶融して固めた「ガラス固化体」として最終的に処分される。1 人の人間が生まれてから 80 才まで、仮に電力の 50% を原子力発電でまかなうとすると、発電に伴って発生するガラス固化体はゴルフボール 3 個分と極めてわずかなものである。このガラス固化体は、30 年～50 年にわたり貯蔵・冷却した後、深地層処分場に地層処分することが考えられている。

ガラス固化体は高レベル廃棄物を溶融したガラス中に溶解させ、キャニスターと呼ばれるステンレス鋼の容器に充填固化し、溶接して封入する。このキャニスターは金属製の封入容器（オーバーパック）に収納し、その周りにベントナイトを配置した状態で Fig. 18 に示すように 300～1000m の深地層または岩盤中に処分する。ベントナイトは非透水性のため、地下水が流れることはなく、核種はガラス固化体から仮に溶け出しても拡散過程で外側へ移動する。ベントナイトはまた特に陽イオン核種を吸着する性質があり、拡散による移動速度は著しく遅くなる。従って、ベントナイト中を移行する過程で多くの核種は崩壊し、ベントナイトは核種封じ込め障壁として重要な役割を果たす。

一方、還元雰囲気が予想される地層処分環境下において、ベントナイトは金属製オーバーパックと長期間にわたって接触することにより変質（Fe 型）する可能性がある。これは緩衝材の長期安全

Fig. 18 High level nuclear waste disposal buried in the deep ground by using canisters in overpacks.

性評価上、重要な問題で、Fig. 19 に示すように非常にビームの細いマイクロ X 線 CT で圧縮ベントナイトの微細構造を観察したり、地下の還元環境を模擬したグローブボックス中で Fe 型ベントナイトの調製と特性評価を行っている。

Fig. 20 はモンモリロナイトの微細な分子構造を示したものである。モンモリロナイトは、ミネラル含有物でコロイド状のケイ酸塩と微量元素で構成される物質である。処分場の建設には、特に堆積岩を対象とする場合には、多量のセメント材料が使用される。コンクリートと地下水が接触した場合、セメントの溶解や地下水の高アルカリ化が起こる可能性がある。そのため、セメントの長期的劣化のメカニズムや、高アルカリ環境下でのベントナイトの化学的挙動も研究している。このように高レベル廃棄物の埋設処分研究は、地下水とベントナイトなどの粘土や微量元素を取り込んだモンモリロナイトの相互作用など、固液二相流の研究分野で、多くの学生が熱心に研究に取り組んでいる。

Fig. 19 Micro X-ray CT and Grove box used for the high level nuclear wastes.

Fig. 20 Structure of montmorillonite.

3.4 エネルギー変換システム研究室 (近久武美教授)

環境調和型社会の実現に向け、科学的ならびに社会工学的観点から、都市エネルギーシステムの

最適化、自動車用燃料電池システム、物質変化を伴う乱流場のマイクロな混合拡散および熱移動に関する基礎研究を行っている。多くの研究テーマが混相流現象の範疇に入るが、ここでは、Fig. 21 に示す固体高分子型燃料電池内現象の解明と高性能化について紹介する。

固体高分子型燃料電池（PEFC）内では、電池内に燃料である水素と酸素が触媒層で反応して発電した後に発生する水の排水や、それに影響を受ける電極内の電流密度分布の不均一化などが課題であり、ガス拡散層基材の構造を最適化する必要がある。特に、燃料電池用ガス拡散層基材（GDL）は、Fig. 22 に示すように、陽極（アノード）と陰極（カソード）の電極の間にあって、①燃料である水素や空気の電極（触媒）への供給、②電極での化学反応により生じた電子の集電、③電解質膜の保湿および生成水の排出といった多くの役割を担う多機能部材である。ガス透過性と導電性のほか、耐食性や機械的強度など多様な要求を満たす必要があり、一般にカーボンペーパーやカーボクロスが使われている。

Table 1 に PEFC の技術課題を示す。電解質膜のドライアウト、セパレータや GDL 層の浸水、Fig. 23 に示す凍結対策などが混相流分野の課題である。経済的には白金触媒を用いることによる高コスト、水素供給ステーションなどのインフラ整備

Fig. 21 PEFC test module and its principle.

Fig. 22 Schematic structure of a PEFC.

Table 1 Technical problems for PEFC.

Dry-out : Increasing membrane resistance due to dehydration in MEA
Flooding : Obstructing gas supply by condensed water
Freezing : Obstructing gas supply by freezing produced water
High cost : Using platinum catalyst and exhaustion of resources
Infrastructure improvement : Building the hydrogen station

Fig. 23 Ice distribution inside GDL (High humidity).

などの課題がある。

3.5 流動場システム工学研究室（村井祐一教授）

流動の物理メカニズムや非線形応答についての基礎研究と、その知見を活かした流れ制御論について多様な応用研究を行っている。前任の武田名誉教授が開発し、田坂助教が後継して拡張している UDM は超音波発信器兼センサを用いて超音波を金属配管内に入射させ、瞬時に流れの空間構造を捉えることができ、配管内流れに適用して液体の瞬時流量や気液二相の相分布構造、ならびに混相流量を求めることができる。この方法では従来の方法とは全く異なり、配管内の流れの分布形状や発達具合を仮定する必要がないので、高精度で流量を求めることが可能である。前任の武田教授は東京電力との共同研究により Fig. 24 に示すように米国の国立標準技術研究所（NIST）、筑波の計量研究所、オランダの国家計量標準機関（NMI）で精度の検証実験を行い、0.2～0.5%の精度で測定できることを確認した。村井教授は、超音波混相流量計を開発し、燃料パイプラインのオンライン流量計として適用している。

Fig. 25 は船舶の航行エネルギーを削減することを目的とし、船底に空気を気泡にして噴出する実用化研究である。実船を用いて航行抵抗が約 20% 低減することを確認した。船底に気泡を送る動力等が必要であるが、正味約 10% 以上の省エネルギー

一を達成することが可能である。海運に用いられるエネルギーは陸上輸送の約 60%もあり、海運の省エネルギー、大気汚染防止も低炭素化社会の実現にとって重要である。

(a) at NIST(USA)

(b) at NMiJ(Tsukuba)

Fig. 24 UDM calibration test by NIST and NMiJ.

Energy-Saving by Bubbles

Fig. 25 Energy savings for ships by air bubbles.

3.6 応用熱工学研究室（小川英之教授）

環境調和型社会の実現に向け、主にエンジンシステムを対象とし、高効率・環境適合化機構解明、混合気形成と高温高速燃焼の制御、将来燃料の評価と高度利用、高温・高圧下でのガス成分と温度場の画像計測、過渡応答評価など、高温高密度熱エネルギーを軸にその高度化変換システムに関わる研究を行っている。ディーゼルエンジンのシリンダー内への燃料の噴射や燃焼過程は、気液二相流の分野になる。なかでもディーゼル燃焼はコモンレール噴射系の普及により高圧噴射化および多段噴射化が可能になるとともに、予混合化燃焼や低温燃焼など新しい燃焼法が考案され、従来の燃焼から大きく進展している。燃焼効率は約 50%に向上し、欧州を中心に低炭素化社会を牽引している。Fig. 26 はディーゼル燃焼の実験装置、Fig. 27 は可視化したディーゼルエンジン内の燃焼過程を高速度カメラを用いて撮影した連続画像である。燃料噴射圧力が 40 MPa（上段）から 150 MPa（下段）に上昇することにより、噴霧の貫徹距離が大きくなって空気との混合が改善され、ススの濃度に対応する火炎の輝度が低下し、噴射開始後 45 度の燃焼終盤には青いレーザー光が透過し、ススが消滅していることがわかる。このようにディーゼルエンジンの燃焼は、最新技術

が導入されることで大きく進化している。

Fig. 26 Diesel engine combustion test apparatus.

Fig. 27 Visualized test results in Diesel Engine.

4. 結 言

原子力とエネルギー利用分野の低炭素化推進を目的とした北海道大学大学院工学研究院エネルギー環境システム部門におけるエネルギー環境教育と人材育成について紹介した。原子力発電所の炉心の沸騰、過酷事故を含む安全性研究、高温高圧の蒸気系配管の減肉事象、高レベル廃棄物の深地層埋設処分などの原子力利用分野、燃料電池やディーゼルエンジン、船舶の省エネと高効率化による低炭素化社会の実現には、気液あるいは固液の混相流研究と技術者の育成が欠かせない。

謝 辞

本総説の執筆に当たり、当部門の各研究室の先生方のご協力をいただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- [1] Moor, P., Greenpeace founder makes the case for nuclear, Nuclear News, July (2005), pp.15-21.
- [2] <http://nettv.gov-online.go.jp/prg/prg2711.html>
- [3] Fischer, E., "Nuclear district heating: The Swiss experience", District Energy, 90 [3], (2004).
- [4] Graf, M., "REFUNA AG", Munda-verlage, Grugg, (2004).
- [5] http://www.hepco.co.jp/ato_env_ene/environment/environment.html
- [6] <http://www.eng.hokudai.ac.jp/graduate/div/#d123>