

原子力教育と次世代原子力システム開発の夢

大阪大学大学院工学研究科* 教授 竹田敏一

要旨

大学における原子力教育を中心として、その現状並びに今後の望ましい方向について述べる。将来の原子力教育・研究を魅力あるものにするにはどのようにすればよいかについて考える。また原子力カルネッサンスを今後とも継続するために教育用（研究用）原子炉を今後とも維持する必要性について述べる。

1. 背景

エネルギー保障と安定供給に対する世界の関心や、環境問題と調和する基幹エネルギー源としてポテンシャルの高い原子力エネルギーへの期待が大きい。欧米などの原子力エネルギー利用諸国では原子力復興の気運が高まっている。

米国では原子力2010プログラムで、2010年までに25基以上のプラントが建設予定であり、さらに第4世代（GENIV）原子力システムの研究開発に関する国際フォーラム（GIF）を発展させるためにGNEP（国際原子力エネルギーパートナーシップ）を提案した。

GIFへの参加国は、米国・ロシア・フランス・英国・日本・韓国の他12カ国であり、あとEUが参加している。GIF発足後、6つの候補概念が選定され、2002年12月にロードマップを策定した。2005年2月28日、ワシントンDCにて枠組協定（2005年2月25日に閣議決定の行政取極）が締結された。

GNEPのパートナーシップ国は中国・フラン

ス・日本・ロシア・英国・米国の6カ国の予定であり、その目的は次の4項目である。

- ・ 米国の海外の化石燃料への依存度を下げ、経済成長を促進する。
- ・ 核拡散抵抗性を高める先進的技術を活用して核燃料リサイクルを行い、より多くのエネルギーを再生産するとともに廃棄物を低減する。
- ・ 世界の成長と繁栄、クリーンな開発を奨励する。
- ・ 世界の核拡散のリスクを減らすため、最新の技術を利用する。

GNEPを推進するため2007年4月に日本政府は日米原子力エネルギー共同行動計画を策定し、署名した。この計画に盛り込まれた研究開発協力をJAEAが進めていくことになっている。また、DOEは産業界を対象とした公募資金プログラムを発表した。（FOA:Funding Opportunity Announcement）.これに対し、2007年6月に三菱はAREVAと共同して応募し、先進リサイクル炉（ARR）は三菱が主導しARR用の燃料再処理のための統合核燃料取り扱いセンター（CFTC）はAREVAが主導する予定である。

また、フランスではシラク大統領が2020年に高速原型炉の運転を開始すると表明した。

日本では平成18年に資源エネルギー庁の総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会が新・国家エネルギー戦略を発表し、このエネルギ

* 大阪府吹田市山田丘2-1

一需要の中で日本においても高速実証炉を2025年までに建設し、商用化を2050年頃に実行する原子力立国計画を打出した。

また、大学及び高等専門学校における原子力分野の人材育成の充実を支援するため文部科学省と経済産業省は「原子力人材育成プログラム」を平成19年度から開始し、①原子力研究促進プログラム ②原子力コア人材育成プログラム ③原子力教育支援プログラム ④チャレンジ原子力体感プログラムを公募し、19年度は大学29件、高専8件、20年度は大学34件、高専9件の採択があった。

2. 大学における原子力教育

最近の原子力関連のカリキュラムは北海道大学、東北大学、筑波大学、東京大学、東京工業大学、武蔵工業大学、名古屋大学、福井大学、福井工業大学、京都大学、大阪大学、神戸大学、九州大学等19大学に存在し、各大学でそれぞれ特色ある学部、大学院教育を実施している。

各大学の特色をまとめると、概して2種類に分離できる。1つは最近の原子力リネッサンスを反映して、学科名、専攻名に「原子力」とつけた大学、もう1つは環境、機械等の学科と統合して専攻名を「環境・エネルギー工学」等に変更し、教育・研究内容の幅を広くした大学である。ここでは前者の例として東京大学、後者の例として大阪大学を挙げ、簡単にその特色を記す。

東京大学では2005年4月に優秀な原子力人材を育成するため、原子力専攻(原子力専門職大学院)、原子力国際専攻の2専攻を発足させている。原子力専門職大学院では、原子力利用において遭遇する様々な問題を理解し、自らの頭で考え解決できる能力を持つ人材、すなわち「問題解決能力を持つ原子力専門家」の育成を目標としている。旧来の原子力系工学科に存在した原子力工学の基礎科目や、原子力の利用と関係する応用科目だけでなく、原子力利用と関係する法規と社会規範に関する講義、社会の中の原子力問題の困難さを理解し、対処法を誤らない能力を養うための講義や演習も用意されている。

原子力国際専攻は国際舞台で活躍できる人材の輩出を目指している。これまでの原子力から、さらに新しい時代に対応した原子力エネルギーへの展開が重要だと考え、革新技術を積極的に取り入れた「先進原子力エネルギー」、社会の受容性や原子力の技術政策においては、国内のみならず国際規模での戦略も必須であるという観点からの「原子力社会工学」、目覚ましい利用が展開されている診断、治療分野の「先進レーザー・ビーム科学と医学物理」の三大重点分野の研究・教育を柱としている。

大阪大学では2005年4月に旧原子力工学専攻と環境エネルギー工学専攻を統合して新たに「環境・エネルギー工学専攻」を発足させた。さらに、学科も2006年4月より「環境・エネルギー工学科」となった。本稿ではこの新専攻、新学科のうち原子力教育に関するカリキュラムについて説明する。

学部教育としては、学部2年までには言語学、数学、力学、化学、生物学の基礎科目並びに環境・エネルギーの課題に対する視野を教育する講義・演習がある。学部3年からは炉工学、量子線生物学の基礎、原子炉システムについて教育し、原子力を学ぼうとする学生の基礎学力を養成する。4年生では各研究室に配属され教員や先輩の指導のもとで独自のアイデアと工夫により創造的な卒業研究に取り組む。これが研究者、技術者としてのスタートとなる。

また、学生実験では近畿大学の原子炉を用いて、学生に臨界近接、臨界を体験してもらう原子炉実習を実施している。

大学院教育ではまず、課題の発見と未来志向的な思考を促し、さらに、ダブル・メジャー的な習得目標に沿って、多種のプログラム(環境マネジメント、共生環境デザイン、循環型材料・資源システム、共生エネルギーシステム、保全・共生システム、量子エネルギー、環境リスク管理)のうちから2つを選択、履修する独自の教育システムを提供する。その結果、専門分野を深めると同時に、上記の学際性とマネジメント能力を身につけることを支援する。

原子力学を教える量子エネルギープログラムでは中性子工学、炉物理、炉制御エネルギー変換材料等の専門的な分野を教え、原子力の仕事をマネージできるポテンシャルを授ける。

修士課程での原子炉実習としては京都大学原子炉実験所臨界集合体KUCAを用いた大学院実験、「もんじゅ」シミュレータを用いた実習を現在実施しており、これに加え、「常陽」を用いた実習も実施している。大学院を修了した学生はより深く、原子炉を体験できるようにしている。

大学院実験に加え、大阪大学の原子力教育のユニークなものとして「実践力向上のメンター制とPBリーダー養成プログラム」制度がある。これは、文部科学省の「魅力ある大学院教育」イニシアティブ（2005-2006）に採択されたプログラムで、将来の原子力開発等を担う若手技術者の養成を目指している。

大阪大学では、次世代原子力技術開発を担う研究拠点を形成するため、「原子カルネッサンス・イニシアティブ」を平成18年4月に発足させた。「原子カルネッサンス・イニシアティブ」では、工学研究科の横断的組織として個々の研究者との協働を推進するとともに、関西地区の原子力研究・開発機関との連携を強化し、産官学の研究ポテンシャルの結集を図る。さまざまなポテンシャルを持った個の結集によりその力が増幅されることを期している。

「原子カルネッサンス・イニシアティブ」は、(1)“原子力エネルギー学”の研究、(2)次代を担う研究者や技術者の教育、(3)国のエネルギー政策や産業界の活動への協力や地域社会への分かり易い説明責任の一端を担うなどの社会貢献を3つの柱として活動している。

以上、東京大学及び大阪大学の教育・研究の特色について述べたが、今後の原子力教育について考えてみる。

大学における原子力教育は各大学の特色を出して、それぞれの目標を達成するべきである。原子力の将来を担う優秀な学生を育てるためには・原子力基礎教育に加え、夢のある教育・研究を大学

として実施し、学生に原子力の魅力を感じさせる必要がある。

原子力基礎教育としては原子物理学、原子炉物理学、熱水工学、原子力工学、燃・材料工学、放射線物理、放射線計測に加え、原子力法規、核不拡散のカリキュラム、さらには工学倫理の講義も必要となる。これらのカリキュラムを如何に体系的に教育するかが、大学および教官の腕の見せどころとなる。

原子力の魅力については原子力立国計画にも謳われているように、一つとしては高速増殖炉の実用化がある。将来は放射性廃棄物の量を減らすため、長半減期の核分裂生成物、さらにはマイナーアクチニド核種（Np-237、Am-241、243、Cm-242、244等）を核変換させ消滅させることが望まれる。高速スペクトル炉ではこれらの核変換が可能であり、どのようにそれを実用化するかは非常に興味があることである。さらには、次節で示す次世代炉国際フォーラム（GIF）で取り上げられている次世代原子力システム（第4世代原子力システム）を国際協力の下、推進していくことは学生にとって非常に魅力のある研究になると思われる。

3. GIFと国際協力

GEN-IV 原子力システムでは持続可能性、経済性、安全性、信頼性、核拡散抵抗性が必要事項として要求されている。特に、持続可能性に関しては長期に亘るエネルギー源、燃料有効利用の他、放射性廃棄物を最小にする、さらにはその管理が確実に実施されることが明記されている。安全性、信頼性に関しては、仮に事故が発生しても周辺住民がサイト周辺から避難する緊急体制が不必要になることも謳われている。このような次世代の革新的原子力システムとして表1に示される6種のシステムがある。高温ガス炉（VHTR）、ナトリウム冷却高速炉（SFR）、超臨界圧炉（SCWR）、ガス冷却高速炉（GFR）、鉛冷却高速炉（LFR）、熔融塩炉（MSR）である。

高速ガス炉はガス（He）冷却の黒鉛減速炉であ

り、ガスの炉心出口温度を900~1000℃にすることが可能であり、この高温を利用し熱化学プロセス等による水素製造ができるのが特徴である。ナトリウム冷却高速炉は炉内圧力が1気圧程度と加圧されていないことが特色であり、小型炉から大型炉までの設計が日本、ロシア、フランス、米国、中国、インド等で進められている。超臨界圧炉は水を臨界圧力点を越えた状態で使い、高温、高圧からくる高い熱効率を狙うシステムであり、東大の岡教授が提案した日本生まれの原子力システムである。このシステムは熱中性子スペクトル、高速スペクトルの共方が可能であり、非常に興味があるが、臨界点近傍での流動不安定性の検討が今後の研究として残っている。ガス冷却高速炉はフランスを中心として研究が進められており、高温のガスによる熱効率の向上が狙いである。

表1 GEN IV の 原子力システム

システム	中性子スペクトル	冷却材 (温度:℃)	燃料サイクル	サイズ (MWe)
VHTR	T (熱中性子)	He (900-1000)	閉	250-300
SFR	F (高速中性子)	Na (550)	閉	30-150 300-1500 1000-2000
SCWR	T or F	H ₂ O (510-625)	閉/開	300-700 1000-1500
GFR	F	He (850)	閉	1200
LFR	F	鉛 (480-800)	閉	20-180 300-1200 600-1000
MSR	F or T	フッ化物塩 (700-800)	閉	1000

このようにGIFとしては6種の原子力システムを提案している。日本は原子力エネルギーを基幹電源として用いることが国の方針として決まっている。図1に示されるように中期的には軽水炉を主体とし、中長期的に高速炉 (FBR) に移行し、基幹電源の安定化を図ることになっている。

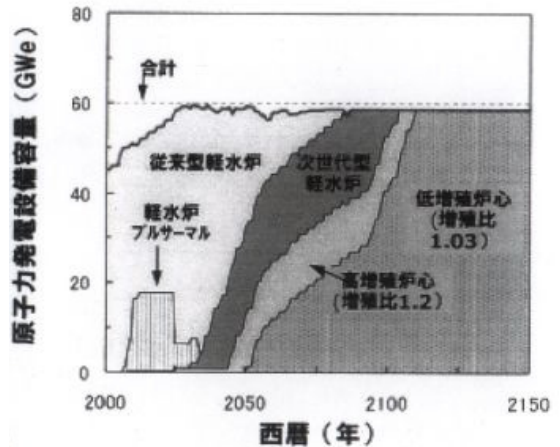


図1 原子力システム導入計画案 (JAEA資料より)

ナトリウム冷却高速炉の実用化を図るためには革新技术の採用による経済性を有するシステム設計、コンパクトで高性能な炉心開発、ナトリウム固有の課題を克服し、信頼性を確保する設計、自然循環冷却および受動的炉停止系を採用した安全性の向上、およびこれらに適合したプラント概念の構築が必要となる。

4. 原子力を拓く夢のある研究

日本では高速炉 (ナトリウム冷却高速炉) の実用化にあたって、大出力2ループシステム、配管短縮化、炉容器縮小等を革新技术の採用により検討し、さらにマイナーアクチニド燃焼、高燃焼度、コンパクトな高性能炉心等の研究開発、さらにはその基盤となる基礎研究の充実が求められる。

このような研究開発は「常陽」「もんじゅ」を用いて実施される。特に、「もんじゅ」は2009年2月頃、臨界が予定されている。性能試験も約2年余り続くので、実用化に向けての試験に期待したい。性能試験は、「もんじゅ」の所期目的である発電プラントとしての運転信頼性実証、運転経験を通じたナトリウム取り扱い技術確立のほか、研究開発の場としての活用、利用、国際研究開発拠点化の

観点からも重要な役割を持っている。

大学としても「もんじゅ」を以下の観点から利用できることを期待する。

(1) 新しい手法・測定法の適用

高速炉を対象とした新しい解析手法・測定法の開発を行い、「もんじゅ」に適用する。例としては、

a) 解析手法

- ・ 3次元キャラクタリスティクス法による燃料ペレット、箔の反応率計算
- ・ モンテカルロ法による出力校正・遮蔽解析

b) 測定法

- ・ フィードバック反応度の成分分離
- ・ 炉雑音解析による炉心パラメータ評価
- ・ 動的制御棒価値測定

(2) 「もんじゅ」測定データ利用による研究活性化

「もんじゅ」は10年を超える停止により燃料中にPu-241の壊変によるAm-241が蓄積されている。Am含有炉心の炉心特性測定値からAmの核特性への影響、Am核データの妥当性が評価できる。また、自然循環・温度成層化に対するデータ（温度・流量データ）から熱流動計算の向上を図ることが可能となる。また、Na技術関連として不純物挙動解析、蒸気発生器に異常検出のための音響計の開発等が考えられる。

(3) 若手人材育成

「もんじゅ」性能試験の測定データ解析に是非、学生（大学院学生）を加えていただくことを期待したい。実機高速炉の解析を自ら実施することにより原子力開発の魅力を知ってもらうことを期待する。

(4) 国際協力の推進

核データの比較（特にマイナーアクチニドのJENDL、JEFF、ENDF/Bデータの比較）炉心計算ツールとV&V、熱流動に関する国際ベンチマークを提案し、「もんじゅ」データにより国際協力を推進する。

以上、高速炉関係の将来の研究テーマについて述べたが、その他の革新炉、燃料、サイクル、廃棄物関係の研究も重要なテーマであり、大学としてその基盤研究の向上に寄与したく考えている。

また、大学の原子力教育には教育用（研究用）原子炉、臨界集合体による学生の実地教育が不可欠である。日本では東大の弥生炉、京大原子炉のKUR、KUCA、及び近大の近大原子炉により多くの大学の学部学生、大学院生を対象として、原子炉運転、炉物理の実習を実施している。

これらの原子炉の維持、管理には多大の管理・運営費用、マンパワーが要求されている。

将来の原子燃料、原子炉本体、建屋の老朽化が生じることを考慮し長期間に亘り教育用の原子炉を存続させる工夫が必要となる。この作業は各大学だけでなく、学会、政府機関、産業界を含めて議論し、日本の原子力教育を支えていかねばならず、協力体制が求められる。原子力カルネッサンスが世界で謳われている折、原子力教育のルネッサンスを日本でも是非実現させたいものである。