



欧州連合における核融合教育

VAN OOST Guido

Department of Applied Physics, Ghent University, B-9000 Ghent, Belgium

(原稿受付：2009年6月18日)

欧州連合 (EU) の核融合計画が世界的に核融合研究・技術分野を先導し続けてきたその原動力を維持すると、また、ITER や DEMO を建設したり運転できる人材を確保することを目的とした、最近の EU における教育プログラムを概説する。

Keywords:

education, EU fusion programme, Erasmus Mundus European Master, Fusion Education Network, human resource management, ITER, DEMO

1. はじめに

現在、核融合研究は新たな段階に入りつつある。つまり、ITER の建設、幅広いアプローチ (BA)、さらには DEMO へ向けた準備が本格化する中、核融合研究計画の拡張、そして、プラズマの物理から、より工学寄りに、あるいは、炉材料分野への重点の移行が必要となっている。また、産業界とのより密接な協力は言うまでもなく、計画管理、核に関する利権、品質管理、危機管理、財務管理など核エネルギー開発に関わる様々な問題に対処する必要に迫られている。基礎的なプラズマ物理の分野においてさえ、その重心の移動は無視できなくなっている。EU において磁場閉じ込め核融合の研究は欧州原子力共同体 (European Atomic Energy Community (EURATOM)) によって強力に集中管理されており、厳密な意味での単一国家研究プロジェクトは存在していない。EU の研究は EURATOM に属する 20 以上の研究所 (核融合協会 (Associations for Fusion) と呼ばれる) によって執り行われている。

EU に属する大多数の国とスイスはこの協力協定に調印しており、具体的に実働する枠組みとし欧州核融合開発合意 (EFDA) が、世界最大の核融合実験装置である欧州連合トカマク (JET) の研究を行い、また将来の核融合装置に必要とされる技術開発を行う組織として設立されている。EU の核融合研究計画は、EU における共同研究開発の一つの原型として、いくつかの計画と装置の相補性を維持管理してきた。このように強力に集積された組織が EU の

磁場閉じ込め核融合 (MCF) 研究の中心位置を占めており、まさに、この組織が次世代の大型国際協力実験装置である ITER をカダラッシュに建設することに決定した母体なのである。

EU の核融合研究が世界最先端の地位を確保してきた先進性を維持し、ITER や DEMO を建設・運転できる適切な人材の確保を行うためには、EU の核融合計画のさらなる拡大、必要となる資質の変化や核融合分野における専門家の高齢化に対応できる長期的人材の管理が必要となり、最低でも毎年 40 人の新しい研究者の補充が必要になると見積もられている。

この人的資源に関する戦略の鍵となるのは、今後、核融合科学や核融合工学において必要とされる専門家の需要と供給のバランスをうまくとれるよう周到に計画された教育プログラムの策定である。ポローニア宣言¹の枠組みの中で、先進的な核融合教育・訓練と専攻学位をよりよく調和させ、EU の研究分野の学術的な資源との相互交流・交換を強める必要性が一層増している。

EURATOM の中では EFDA 合意を通して十分に成熟した協力関係を構築してきた経緯があるため、核融合教育は EU にとって、その卓越した実力を十分に発揮できる分野であると言える。EU を縦断して核融合教育を調整することによって、共通の教育目標と基準の設定が可能となり、質の高い教材を開発でき、また、研修用実験装置やヨーロッパ内の実験設備に容易にアクセスできるようになる。

* 原文は 2008 年 12 月に開催された第 18 回土岐コンファレンスの招待講演の内容に基づきプロシーディングスとして発表されたものである。すべてのプロシーディングと、発表資料は、<http://www.nifs.ac.jp/itc/itc18/> から入手できる。

1 ポローニア宣言：1999 年 EU 内の高等教育の標準化をはかるため、これまでの学位やカリキュラムの評価を確認しつつ、標準的な学習内容を確保して互換性のある単位のシステムを構成することを宣言した。現在この宣言に合意している国は以下の 29ヶ国に及んでいる。オーストリア、ベルギー、ブルガリア、チェコ、デンマーク、エストニア、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、ハンガリー、アイスランド、アイルランド、イタリア、ラトビア、リトアニア、ルクセンブルグ、マルタ、オランダ、ノルウェー、ポーランド、ポルトガル、ルーマニア、スロバキア、スロベニア、スペイン、スウェーデン、スイス、イギリス。

また、EUの研究者がEFDA合意の下で、成し遂げてきたように、JETは、EUの共同研究設備として、教育と訓練の刺激的な環境を提供するという特殊な役割を果たすこともできる。

現在、EUにおいて、核融合の訓練と教育に関しては、次のような取り組みがなされている。

- ポストの流動性確保（通常ポストから）制度の導入
- 国家的補助制度と関連研究所による奨学金の導入
- 欧州核融合理工学博士号の制定
- ITERに向けた欧州研修制度の導入：すでに、いくつかの研究所はITERの研究開発の鍵となる分野に対してポストを提供している
- 核融合理工学分野のエラスムス・ムンドゥス（Erasmus Mundus）修士学位の制定
- 欧州共同支援事業（CSA）（EU Coordinated Support Action）《核融合教育ネットワーク》FSNETの開設

ここでは、最後の2つの項目について概説する。

2. エラスムス・ムンドゥス“欧州核融合理工学修士号”（FUSION-EP）

エラスムス・ムンドゥス²計画の中で、欧州核融合理工学修士課程が次の機関（FUSION-EP）から構成されている。

- ベルギー、アントワープ大学（Universiteit Gent, Belgium）（事務局）
- フランス、アンリポアンカレ大学（Université Henri Poincaré, Nancy, France）
- スウェーデン、王立工科大学（Kungliga Tekniska Högskola (KTH) Stockholm, Sweden）
- ドイツ、ステュツガルト大学（Universität Stuttgart, Germany）
- スペイン、マドリッド・コンプルテンセ大学（Universidad Complutense de Madrid, Spain）
- スペイン、カルロス三世大学（Universidad Carlos III de Madrid, Spain）
- スペイン、マドリッド工科大学（Universidad Politécnica de Madrid, Spain）

ITERのホスト国であるフランスもまた、現在のエラスムス・ムンドゥスの一員である。すべての加盟組織は、EURATOM傘下の核融合研究計画の中で長い間協力関係を構築してきているため、透明性が高く、強い相乗効果が保証されている。修士課程（<http://www.em-master-fusion.org>）の目的は、良く集積された言語的、文化的な環境の中で、レベルが高く国際的で研究を指向した核融合に関連する理工学分野の教育を、協力研究機関の研究活動と密接に関連させながら、提供することにある。上記7つの

大学の複合され、調和のとれた教育研究は、核融合理工学の分野において、それぞれの大学で独自に行われるよりも遥かに多様性に富んだ専門能力を提供することができる。したがって、学生にとってもより専門知識を得る機会が増えるという意味での多大な付加価値を保証するものとなっている。欧州連携修士課程では、かつてなかったほど緊急で深刻な世界のエネルギー供給の問題に対し、その解決に向けた寄与が非常に重要となっている分野で活躍しようとする修士レベルの学生に対し、真に全EU的な機会を提供している。現在、核融合技術・工学、およびプラズマ物理学の分野で数多くの科学者と技術者が必要となっており、その育成には通常10年の期間を要する。これに対応するためには、全EU的な修士レベルの教育体制がなければならない。特筆すべき点は、核融合研究は科学と工学の多くの分野で重要なスピノフが年々増加していることであり、この中には、新素材、ナノテクノロジー、超伝導コイル、ロボティクス、電子部品、大電力高周波源、宇宙推進が含まれる。

物理学の研究教育は、物理学の技術的な応用に用いられており、コンソーシアム内の様々な研究所の研究活動によって強力に支援されている。これらの研究教育は、工学分野の学位の基本的な考え方と物理工学者としての教育のエッセンスをうまくバランスさせて、学生を大学や研究機関や産業界で科学技術的な研究を担い、先導していきけるように教育・訓練しようとしている。

これらの研究教育の工学的な側面は、物理工学者に解析法、設計法や、さらには、既存あるいは新たなシステム、製品、機械、材料などを単純なモデルにして扱いやすい形で最適化する手法などを習得させることである。物理学的な側面は、還元論的なアプローチが中心となる。ここでは、実験や数学的モデリングによって物理現象の本質に迫ったり、適用可能な物理法則を発見するための試行を行う。たとえこのアプローチが哲学的になったとしても、厳密な科学的姿勢が基本であり、物理学的な理論は実験による裏づけがなければならない。

研究開発の目的のためには、なによりもまず、物理工学者として訓練されなければならないが、広範な領域にわたる教育によってはじめて、深い物理の知識を必要とされ、分野横断的な研究開発が行われるあらゆる企業や研究所にとって望ましい人材が育成される。このようにして教育訓練された物理工学者は、世界中で最も卓越した研究拠点としてのEU内の研究所にとって、今後必要とされる研究者のかなりの割合を占めることになるであろう。この研究と教育の両面が、将来的に、方針決定などを行う重要な仕事をこなせる物理工学者を育てることになる。

協力機関の専門分野を考慮して、このプログラムには次の3つのコースが用意されている。(i)核融合を指向した)プラズマ物理、(ii)物理学における計算機手法、(iii)機器整備開発と放射線である。プログラムの構成にあたっては、3

2 エラスムス・ムンドゥス（Erasmus Mundus）：EUの高等教育分野における教育機関の連携と、学生・学者の交流を促進するための計画。名前は、15世紀から16世紀に活躍したオランダの人文学者のエラスムスに由来する。エラスムスは、欧州各地を歩き回って研究を続け、当時欧州で活躍していたほとんどの知識人と交流していた。ムンドゥスは、世界と言う意味のラテン語。

つの国の3つの大学に在籍することを必須としている。つまり、課程在学中の2年間の中で、第1、第2半期はA大学、第3半期はB大学で学び、第4半期はC大学で修士論文を完成させる。第3、第4半期は同一の専攻コースで学ぶこととなる。第2半期の後に夏のイベントが催され、そこで、選択コースと修士論文のテーマが提示される。学生の流動性確保は、このプログラムの基本的な哲学であり、このように、もともとシステムとして組み込まれているのである。

入学許可の基準は、物理工学、応用物理、物理学の学士またはそれと同等の資格を有していること、必要な数学およびコンピュータのスキルと同時に、古典および現代物理の学士レベルの十分な知識を有することが必須である。EUの学生か第三国の学生であるか、奨学金を受けているか否かは問題にしない。また、第三国からの(学生または研究者の)応募者も、高い質を求める明文化された選考基準に則って審査される。

3. 核融合教育のためのエラスムス・ムンドス国際ネットワーク

EU以外の国との協力に関しては、EURATOMは相互協定を結んでおり、EU圏外の組織や企業と特別なチャンネルを確保している。広範な国際協力は、国際原子力機関(IAEA)や国際エネルギー機関(IAE)の枠組みの中で構築されてきた。これらの協力関係はIAEAの組織化研究プロジェクト(Coordinated Research Project (CRP))やIAEの執行合意によって公式に認められている。IAEAはITERの開発のための法的な枠組みを1988年から用意した。すべてのEU連携組織はこのCRPや執行合意に組み込まれているので、EU外の大学や研究機関と特別な強い協力関係をもつことができる。さらに、いくつかのFUSION-EP連携機関は、INTAS³の枠組みの中でNIS(New Independent States)⁴の研究機関や大学と密接な協力関係をもつこともできる。

核融合研究開発に対するEUの考え方は、集積され強力に組織化された進めかたを重視するものであり、結果的にそれが磁場閉じ込め核融合分野においてEUを先導的な立場たらしめたのである。欧州核融合理工学修士プログラム(FUSION-EP)はこのEUの磁気核融合研究開発に対する考え方を学ぶ機会を提供するものであり、広範なアプローチの方法や応用範囲を経験させるものである。したがって、EU内でのFUSION-EPの教育と交流プログラムに加えて、FUSION-EPに参画する研究機関と数多くの第三国のレベルの高い核融合研究教育を専門とする研究機関との新たな協力関係も構築してきている。このネットワークの大きな目標は、核融合研究開発においてEU内外の優れた実績を持つ研究機関の世界的なネットワークを構築することである。FUSION-EPコンソーシアムは、本来EU内の核融

合の研究と教育訓練を行う機関の連携関係であるが、国際的研究プロジェクトであるITERを視野に入れて、様々なEU以外の国のネットワークに属する主要な研究機関との関係を改善し、調整することもめざしている。

第三国の協力研究機関は、内外のネットワークの密度や長期的なFUSION-EPコンソーシアムの研究機関との関係を考慮して選ばれた。それらは、磁場閉じ込め核融合の研究分野においては世界中でよく認知され、活動的な次の研究機関である。

- カリフォルニア大学ロサンゼルス校 UCLA (米国)
- ウィスコンシン大学マディソン校 University of Wisconsin-Madison (米国)
- セントペテルスブルグ州立工科大学 St. Petersburg State Polytechnic University (Russia)
- モスクワ工業物理大学 Moscow Engineering Physics Institute (Russia)
- 中国科学技術大学 University of Science and Technology of China (中国, 合肥)
- 清華大学 Tsinghua University Beijing (中国, 北京)
- 西南物理学研究所 Southwestern Institute of Physics, Chengdu (中国, 成都)

世界の核融合研究開発の主だった政治的経済的集合体(ヨーロッパ, 北米, アジア)は、それぞれが、主なネットワークの節としての二つか三つの主導研究機関に代表されている。この各主導研究機関はそれぞれのネットワークの下流に協力研究機関を持っており、その中での周旋者としての役割を果たしている。FUSION-EPが異なるネットワークの節の間を取り持つことで動的な学習ネットワークを形作るのが基本的な考え方である。このFUSION-EPとEU外のパートナーとのネットワークの間の周旋は、FUSION-EPコンソーシアムを中心にして、これまでは互いに関係を持っていなかったネットワークがその回りにあるようなハブとスポークのモデルで視覚的に想像できるであろう。さらに、そこに含まれるすべての国は、大きなスケールの国際研究プロジェクトITERの一員であり、それぞれの国にあってはこの協力研究機関が主体となって活動している。

この新たな協力関係の具体的な目標は、FUSION-EPの研究機関がEU外の国での核融合研究開発事業や教育環境により密に接し、相互作用をもつことである。この新しい協力関係の形態は、一方ではEUの学生や学者の外向きの流れによって、他方では相互の意見交換や現状分析によって具現化される。この相互交流は、EU外の学生にとって、より良くFUSION-EPのカリキュラムに適合するために重要であると考えられる。EUの学生や学者が第三国の研究機関の環境に接することは、EUの核融合研究開発モデルを基準にしてEU外の学生に教育を施すことの重要性をよ

3 INTAS (International Association for the promotion of co-operation with scientists from the New Independent States of the former Soviet Union (NIS)): NIS諸国の科学の支援とNISの科学者と国際的な科学界との協力を推進するためにEUによって1993年に設立された国際協会。

4 NIS: 脚注3参照, 旧ソビエト連邦圏の東欧諸国と中央アジア諸国。

り深く理解させるために必要なことであろう。また、第三国において核融合研究開発の問題点とその解決への理解を深め、FUSION-EPの教育活動の他の分野からのおもしろいアプローチや実践を集積することが可能となる。

相互交流は、また、ホスト国にとって核融合研究開発の具体的な特性に関する知識を増やすことになり、結果的に、より合目的な将来の研究や教育連携に寄与することになる。このような新たな協力関係はまた、協力研究機関において、相互の基準や、教育機関との将来的な交流を進展させることをめざした教育計画・方法を検討するきっかけをつくる（つまり、FUSION-EPをめざす学部学生によりよい準備を促す）ことになる。学生あるいは学者の交流を通して、EUとEU以外の国々との研究の観点からの総合的な関係強化、つまり、核融合研究開発の実践方法や考え方に関する意見交換などが推進されることも期待される。

さらに、この協力を介してFUSION-EP自身の活動の進展も期待される。それは、まず第一に、将来のEU外のFUSION-EP学生のために参照できる研究機関を世界の様々な地域に確立し、各協力研究機関はFUSION-EPの情報をその国や地域で広めることができるだけでなく、その地域でFUSION-EPの学習プログラムや必要なスキル（例えば、協力機関での短期予備コースの編成など）についてのより詳しい情報を探している学生にとっての情報センターとしても機能するからであり、第二に、EU外の研究機関で短期間の訓練期間を修了する可能性を提供することは、EUの学生にとってもFUSION-EPのプログラムをより魅力的にするであろうし、このエラスムス・ムンドゥスプログラムはEUとEU外の学生の異文化交流を促し、他の国をより良く理解しようとする興味を引き起こし、お互いの理解と協力を強めることになるからである。

4. FUSNET

核融合科学と工学の教育のための欧州核融合教育ネットワーク（FUSNET）が核融合の教育と研修の活動をEUで増やし、強化し、そして広めるための総合活動の一部として2008年10月にスタートした。FUSNETは11の重点活動から成り立っており、200万ユーロの予算がついている。このプロジェクトは、18ヶ国の35の研究機関から構成されていて、そのうち22が大学、13がEURATOMの核融合協会に属する研究機関である。FUSNETプロジェクトは中等教育から学士、修士、博士に至るすべての教育段階をカバーしている。

FUSNETの具体的な目標は、次の事項が挙げられる。

1. FUSNET協会の継続的な設立を行う。これにより、現存する活動を継続したり、EU全体での新しい活動の創成、発展、実行をしたり、情報の交換や普及をするための恒久的な基盤を提供する。
2. 核融合計画やその関係企業においてそれぞれの対象となるグループにそれぞれの教育目標を掲げて全EU規模での整合性ある教育プログラムを構築し、それをFUSNETウェブサイトから簡単にどこから

でも閲覧できるようにする。

3. 質の高い教育材料と訓練のための実験装置を提供する。これらは、EU内のどこでも使用でき、非常に魅力的で効果的な教育機会をつくることになる、また、学生の知識レベルと範囲をより画一化できることにもなる。
4. 流動性を確保する、これにより、EU内の学生がそれぞれ最適な教育機会を与えられ、核融合に携わる人々の中で多くの個人的つながりを持てるようになる。

FUSNETの活動は、すでに、EFDAの下で強力に集積化されているEUの核融合研究プログラムの基盤の上で展開されている。この核融合研究プログラムに属する実験装置や研究グループが教育プログラムにおいても主体となって、学生がこれらの装置を使った実験に最善の形で参加できるようにすることがFUSNETのひとつの重要な目標である。JETではこれまでEU全体の研究者がEFDAの調整により協力して研究を進めてきた経緯があり、教育と研修の場としても特に象徴的な場となっていて、FUSNETにおいても、特別の役割を担うことになる。

このネットワークは、FUSNET協会を設立することで恒久的な活動を保証されることになるであろう、そうすることで、既存の活動や新たなEU全土に渉る活動の創成、開発、普及を行い、核融合教育の情報の交換と啓蒙を行う基盤を提供することができる。

期待されるFUSNETの具体的産物は、EUにおいて核融合の研究機関と高等教育機関を強力に結合させた真に集積された核融合教育システムである。中心となるウェブサイトを通じて、このプログラムは全体として調和がとれ、透明性の高い教育活動の構造を示すことができ、教える側も学生側も核融合研究計画に参画するための魅力的な色々な方法を見つけることができるようになる。

この行動計画の戦略は、高等学校、大学、大学院、工業学校などの中高等教育機関の学生への広い意味での知識基盤の伝達という目標と直接結びついていて、核融合教育においてそれぞれの段階で必要となる活動となる。主に次に掲げる三つの戦略要素がある。

1. **学生数.** ほとんどの国において、その国だけでは核融合を専攻する学生数が少なく、修士や博士の学位のレベルを維持するには不十分である。したがって、EU全土にわたるスケールでの必要学生数の確保をはかる活動を検討、開始しなければならない。
2. **整合性.** システムの中で学生の流れを最適化するためには、それぞれの教育段階の間の連携をよくとらなければならない。これは、中等教育の教師への啓蒙、また彼らと高等教育機関あるいは核融合研究機関との結合を強化すること意味する。
3. **透明性.** 情報の普及と移動性の改善により、EU内の学生の教育機会をより高める。学士、修士、博士レベルの課程をより統一規格化することで、学生に

とって核融合システムの中での位置づけをより明確にする。

EUの核融合教育プログラムはEU核融合研究プログラムの必然的な産物とみなすべきであり、EFDA合意のもとで調整されるべきものである。この教育と研究の二つのプログラムはお互いに密接に調和がとれた形で進められるべきであり、そうすることによる相乗効果は明白である。教育プログラムの究極的な目標は、直接的には高いレベルの研究者による訓練により、間接的には核融合界の根幹を改善することにより、核融合計画を進展させることにある。FUSNETは、もっと直接的には、次の点を通して、質の高い研究に大いに寄与することになる。

- 核融合研究計画の中で学生とその教師の参加と交流を活発にする。
- 魅力的な学生訓練機会の創出を促す。

- 研究グループ間の関係を強化する。

このネットワークを継続的なものにするために、すでに形成されているネットワークをさらに強化発展させるという行動目標を掲げて、欧州調整支援事業（EU Cordinated Support Action (CSA)）によってFUSNET協会が設立されようとしている。ネットワークの組織と構成は、欧州核エネルギーネットワーク（ENEN）と似通ったものとなるであろう。

謝 辞

FUSNETの総合調整責任者であるオランダFOM研究所のNiek Lopes Cardozo教授とMark T. Westra博士から非常に貴重な情報提供をいただいたことに感謝の意を表します。

（訳：久保 伸）