

欧洲の原子力政策と研究開発

平成20年11月14日
原子力政策担当室

本報告は、現地調査、意見交換および入手資料を踏まえて、最近の欧洲(EU、ベルギー、仏)における研究開発、原子力人材確保に係る原子力政策と取組み状況を研究開発専門部会、分離・変換技術検討会に資するためにまとめたものである。

1. EU/EURATOM

(1) FP7(7th Program for Research and Technological Development)

2007年～2013年の7年間の全予算は50.5B€で、原子力関連はEURATOMの予算として5年間(2007～2011年)で2.7B€が計上されており、FP6と比べて41%増加している。

EURATOMの予算の内訳

Fusion energy research	1947M€(900M€はITER以外に充当)
Nuclear fission and radiation protection	287 M€
- 放射性廃棄物管理	
- 原子炉システム(安全性向上、資源の有効利用等)	
- 放射線防護	
- インフラ整備	
- 原子力人材確保、養成	
Nuclear activities of the JRC	517 M€
- 放射性廃棄物管理と環境影響	
- 原子力安全	
- 核セキュリティ	

(2) SNE-TP(The Sustainable Nuclear Energy Technology Platform)

SNE-TPは、EUにおいて原子力(核分裂)エネルギーの発展と展開を期すための基本方針で、持続的なエネルギー生産、経済性の向上、安全性や核拡散抵抗性の向上を目的としたR&Dの方針を示している。この中で、R&Dについての予備的なロードマップを示し、技術開発と並行して、EUで予測される原子力エネルギー利用の拡大を踏まえて原子力人材の教育・訓練、研究インフラの整備の重要性と取り組みを特記している。

R&D-Vision in SNE-TP

○ 将来予測

- ・ 2030年までに800～900GWe規模の建替え及び新設を行い、その後、60年使用。
- ・ Gen-IVは、長期的課題であり技術的に成熟した後で導入されるが、大きな技術

的なブレーキスルーが必要であり 2040 年より以前の導入は期待されない。

- EU27 カ国には 152 基の原発があり、最優先課題は 60 年程度までの寿命延長である。
- 建替えと新設は、Gen-III(EPR)で行い、MOX も利用する。

○ Gen-IV

- 高速炉(FR)による閉じた燃料サイクルシステム(Closed Fuel Cycle)のために、仮想は 2020 年までにナトリウム冷却高速炉(SFR)のプロトタイプを建設する計画(産業、国際にオープン)で、これは EU の新たな戦略の第一歩となりうると認識。
- SFR 技術の成熟度を考慮し、250~600MWe とするが、詳細は未定である。目的は、既存の SFRs に対する革新技術を実証し、Gen-IV 第 1 号商用原発への道筋をつけることである。
- SFR は reference 技術であるが、代替え技術としてガス冷却高速炉(GFR)、鉛冷却高速炉(LFR)も評価し、2020 年までに 50~100MWth 規模の実験炉建設も視野に入れる。

○ 革新的燃料サイクル

- FR による閉じた燃料サイクルシステムを目指すためには、アクチノイド科学、分離技術、MA 含有燃料の開発が必要である。
- リサイクルは MA の分離変換の基礎であり、高レベル廃棄物の隔離期間と処分場の縮減につながる。
- MA 燃焼に関して、加速器駆動システム(ADS)は技術的、経済的な観点から fast-neutron critical reactors といずれ比較する。

○ 原子力システムの安全研究

- EU の原子力システムの設計は、defence in depth に基づいており、その内容は、事故の防止、事故の拡大防止、多重防護システムによる公衆や職業人の被ばく防止である。EPR は極めて可能性の低い事故まで考慮した設計である。
- 原子力システムの安全解析は、通常時、異常時のシステム挙動の完全な理解に依存し、それはより革新的な解析技術と実験による検証に大きく依存する。

○ 原子力エネルギー利用の拡大

- EU は 2030 年ごろからの水素とバイオ燃料利用のビジョンを提示しており、SNE-TP では VHTRs による水素製造技術を開発し、水素・バイオ EU-technology platform 結合を確立することを目指す。

○ 教育と訓練：競争力の再生

- EC、OECD によって、原子力科学と技術は危機的な状況にあるという重大な懸念が示されている。すなわち、従前に比べて包括的な質の高い原子力技術プログラムも大学も減少し、大学は高い資質をもった学生を引きつけることができない状況にある。
- ENEN(European Nuclear Education Network)連合は、原子力人材育成に関する

て 41 メンバーの学術研究組織、研究センターでの原子炉安全、廃棄物管理、放射線防護を含む原子力教育のための ENEN 交換コースや協力等の強化策を開始している。アカデミアと産業界とのインターフェイスの役割を担い、インターンシップ、修士、博士論文のためのプロジェクトや研究テーマの橋渡しも行っている。

- ・ より基盤的な知見を拡大するため、新たに発足した ERC(European Research Council)は、アクチノイド科学や材料科学のような基礎的な研究を重視している。

○ 研究インフラ

- ・ 教育、訓練に加えて研究インフラ、特に EU 予算を必要とする大型の研究インフラを確保することが、原子力分野の EU の位置を強化し、技術革新を支えるための鍵である。EU では、既存の各国施設を含む研究施設、実験炉の設計、建設、運転まで含めて、大型の研究施設は共用化し、互いに補足する方向、即ち、インフラの ERA(European research area)へと向かっている。
- ・ 具体的には、国間のアクセス、共同の研究プログラムの策定、施設や研究者のネットワーク化、共通の実験の共同実施などを促進し、既存の研究施設の利用を最適化すること、さらに、国レベルでは整備できないが、EU レベルで共通の利益があるインフラの新規整備などを行う。
- ・ EU の既存の材料試験炉は、1960 年前後のもので、それに代わるものとして JHR(2014 年稼動予定)を建設中である。これは、Gen-II, -III 軽水炉の寿命延長、安全、燃料性能向上等、Gen-IV 原子炉の材料や燃料に関する研究開発、及び医療用の R I 製造に利用する。

この他、SCK・CEN による鉛・ビスマス系の fast-spectrum 実験システム、医療用 R I 製造のための HFR(high flux reactor)などの整備も検討されている。

- ・ EU の原子力研究インフラの将来像は、既存の研究施設と新規の研究施設をプールし、研究者、研究チームの共同化、ネットワーク化を図り研究コミュニティを構築することであり、SNE-TP はこうした方向を支援・強化する。FP6 で進めてきたアクチノイド科学ネットワーク ACTINET は、25 の研究所といくつかのラボをプールした一例である。

Role and Presentation of SNE-TP

○ Role

原子力分野における欧州産業界の競争力を維持するために SNE-TP では、以下の取組に挑戦すべきとしている。

- ・ ステークホルダー (industry, utilities, research organizations, universities, public bodies) がビジョンを共有すること。
- ・ 他の広範囲の政策(platform)に効果的なインパクトを与えること。 (GHG 削減、燃料電池、GNEP 等)
- ・ 研究開発がバラバラに行われている状況を改善すること。
- ・ 公的及び私的投资を結集すること。

○ Presentation

目標を達成するために、安全への考慮とあわせて、利用者の要求に応じた技術開発を推進するための戦略的研究指針(SRA)を策定している。SRA は3つの目標、

- ①Gen-II,-III(LWR)
- ②Process heat electricity and H₂(VHTR)
- ③Sustainability(Fast systems with closed fuel cycles)

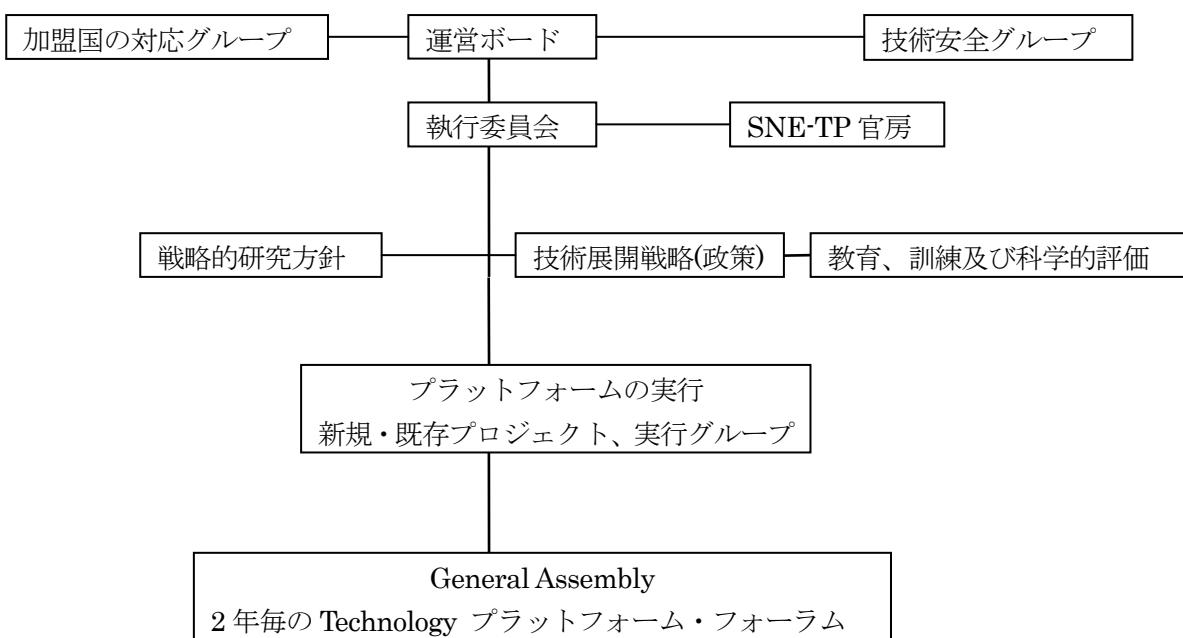
を掲げ、これらを支える基盤的な項目として、

- ・革新的な材料、燃料の開発
- ・原子炉の設計、安全、材料、燃料に係るシミュレーション技術開発と実験
- ・R & Dのインフラストラクチャーの維持と整備
- ・安全基準の策定

を挙げている。

特に、SRA は市場への展開(DS:deployment strategy)を睨んだ研究開発であること、さらに SRA と DS は安全性の要求に厳密に合致したものであることを求めており、そのための助言機能として SNE-PT 運営ボードに TSO(technical safety organization group)を設けている。

SNE-TP の構造



Roadmap of SRA

○ ロードマップの基本的考え方

- ・2020年までにEUのCO₂削減目標に実質的な貢献をすること。
- ・欧州のエネルギーの安定供給と競争力を確保するため、Gen-IIIのLWRを開発し、EUの重要なエネルギー供給源とし、その上で、徐々にGen-IVのFRを導入する。
- ・CDMに組み入れることも含めて、気候変動の防止に効果的に役立つこと。

ロードマップ

Gen-II,III LWRs	2010	調和のとれた寿命延長
	2010-2015	シビアアクシデント・マネージメントの最適化 燃料性能、安全性の継続的な最適化努力
	2010	燃料サイクルの経済性の改良
	2011	SCWR の実行可能性
Gen-IV FR	SFR R&D プログラム	
	2009	設計の予備的な選択
	2012	設計オプションの確定 予備設計・詳細設計、安全解析リポート、R&D 評価 250–600MWe プロトタイプ SFR の建設
	2020	運転開始
		GFR、LFR、ADS の実行可能性と性能を評価するための R&D
	2012-2012	第 2 番の速中性子システムの選択、50-100MWt の実験装置の建設
	2020	運転開始
	2020-2040	実用規模の最初の FR システムを設計、最適化、建設するための R&D、市場への導入
New Application	熱供給、電力生産、脱塩機能を含む水素製造、炭化水素等の輸送用の石油代替燃料の開発、2020 年頃に VHTR 一号機の実現を支援する暫定 R&D 計画	
	2010-2012	重要技術の確定(燃料、材料、出力変換、水素製造等)
	2015-2020	VHTR の建設、コジネの実証
Adovanced Recycling Process		
	2010	MA 含有燃料の開発を含む閉じた燃料サイクルのための技術の選択 －技術的、経済的評価、長期の放射線毒性を考慮した HLW の最適化、必要な処分場容量に関する発熱インパクト
	2012-2017	2020 年の高速原型炉運転をサポートするため、 －燃料製造工場(workshop)を建設 －MA リサイクルのためのマイクロ・パイロットを建設 (分離及び MA 燃料の製造)
	2020-2040	実用規模の革新的燃料サイクル施設の設計し、最適化するための R&D、2040 年頃の市場への導入

2. フランス

(1) 原子力政策と廃棄物管理構想 (French National Report)

原発政策

- Flamanville(1600MWe EPR、2012年稼動)とフィンランドの Olkiluoto に建設中の EPR を使って試験を行い、EPR(Gen-III)を 2015 年までに商用原発として大量導入できるようにする。EPR は 60 年の運転を想定した高い競争力を有している Gen-III 原発である。
- Gen-IV の最初のプロトタイプ原子炉は、2020 年に建設することとし、商用化は 2040 年を想定する。

再処理技術開発等の現状と将来

○ 使用済み燃料(SF)の処理

フランスでは、年間約 1100 トンの SF が排出され、アレバの La Hague 工場に送られている。

- La Hague 工場は 1700tHM/y を再処理し、195t/y の MOX 燃料を生産している。
UP2 プラント：フランス国内の PWR-SF 処理
UP3 プラント：当初は、外国の SF 処理に使われたが、現在はフランスの SF 処理にも使われている。
- MOX は全て Melox 工場で製造。(Caderache 工場は 2004 年に停止)

○ 原子炉と SF 再処理戦略

EPR の導入、Gen-IV のドライバー燃料の製造、デモ炉での照射試験のための MA 燃料製造、2040 年の Gen-IV の市場への導入は、ステップを踏んで行い、それに関連する燃料サイクル技術は、種々のリサイクル戦略、市場のニーズに合うものであることが求められる。こうした観点から、当面 10 年程度は 3 つの R & D を平行して進める。

- COEX™ 法：U と Pu の混合抽出、できれば Np も合わせて抽出する方法で、Gen-III 再処理プラント用で、市場への導入に近い技術。
- DIAMEX-SANEX 法：Am、Cm の選択的分離を行うもので、Gen-IV での均一サイクルのための処理技術で、COEX™ 法との組み合わせもある。
- GANEX 法：アクチノイドの group 分離を目指す長期的、挑戦的な R&D で、Gen-IV の fast system でのアクチノイド均質サイクルに資する。

なお、国内戦略と別に、国際的な新たな市場として、外国の SF の再処理、IAEA による燃料サイクルの多国間構想(地域センター等)、高効率再処理プラント、PWRs や FRs 両方に適合した MOX 再処理、Pu を分離しない燃料取扱・製造工場、高性能 MOX の製造があることも想定しておくことが重要である。

バックエンド技術の現状と開発戦略

○ SF 再処理の現状

仏は、過去 40 年の間に 3 つの再処理プラントを建設。最初のプラント UP1 は、GCR(Natural Uranium Graphite Gas Reactor)の SF を処理するため 1965 年に運転開始し、HLW のガラス固化施設(AVM)が 1978 年に付置された。1997 年まで運転され、1998 年に停止し、デコミに付されている。デコミは EDF と CEA によって資金提供され、約 30 年で終了する予定である。

アレバの UP2 は 400tHM/y の能力をもち、1966 年に運転開始し、GCR の SF の処理を行ってきたが、1976 年に LWR の SF も再処理できるように改造され、1994 年には 800tHM/y まで処理能力が増強された。また、1989 年に UP3 が外国の SF を処理するために建設された。

2003 年には、アレバに対して UP2、UP3 をそれぞれ 1000tHM/y まで処理能力を拡張許可が得られている。アレバがこれまで処理した SF は、2006 年末で、仏国籍が 12,700tHM、外国籍が 10,000tHM である。

○ Pu リサイクル

2006 年末までに、2700 体の MOX 集合体が EDF に供給されている。これは、40GWd/tHM の燃焼度まで許可されているが、より性能を上げるために、MOX 燃料の改良や炉制御の研究が継続中である。

最初の Pu リサイクル利用は、40 年前に Rapsodie 炉で実施された。この燃料は Cadarache で製造されたが、Cadarache での製造は 2003 年に終了し、現在は、全ての MOX 燃料は、MELOX 工場で製造されている。MELOX 工場は 1995 年に運転開始し、1997 年に 100tHM/y、2003 年に 145tHM/y に拡大し、2004 年に 195tHM/y まで拡大するための申請を出し、2007 年に認可されている。

○ 回収 U のリサイクル

1980 年代半ばに、Cruas 原発で実証されている。EDF は回収 U を天然ウラン市場における戦略的物質としてのオプションと位置づけている。

回収 U は、COMURHEX 工場で濃縮するために U_3O_8 または UF_6 として中間貯蔵されており、最終的に FBFC Romans 工場で UO_2 に転換される。

○ ガラス固化技術(Vitrification)

UP2、UP3 での U、Pu の分離係数は 99.88% を達成し、ガラス固化体に含まれる Pu は kg あたり約 1 g である。

アレバは、20 年以上にわたり hot crucible melter(HCM)を用いて、Marcoule の AVM、La Hague の R7(1989 年稼動)、T7(1992 年稼動)施設で 15,000 体 (キャニスター) の HLW ガラス固化体を製造してきた。年間 550 体以上の処理施設である R7、T7 施設を 15 年間稼動し、この間に melter の寿命は 2 倍に延びている。

また、ガラス固化技術の性能を広げるため、CEA と AREVA の共同子会社で Direct-induction cold crucible melter(CCM)の開発を行ってきた。この技術は外部からの電磁誘導による加熱を用いているので、原理的に melter の寿命は無限大であり、様々な

廃棄物の組成に対して順応できる。その特徴は、

- ① 外側の強化ガラスを薄くでき、溶融ガラスによるつぼの腐食を防ぐことができること、
- ② 溶融ガラス容器 (bath) 内部での直接誘導加熱ができるので、より高い鋳造温度が達成でき、新たに高性能の廃棄体を造ることができることである。
- ③ また、液体または固体廃棄物と一緒に溶融材 (melter) を注入し、処理能力 (throughput) と柔軟性(flexibility)の向上を目指した ACCM(Advanced CCM) も開発されている。

使用済み燃料の処理(treatment)、再処理技術開発

○ 再処理技術開発

La Hague 工場は、40 年間（2030 年まで）運転予定。この間に、Gen-IV に適した先進的分離技術を行い、2040 年までに稼動させる。この間に、市場の要求があれば SF の処理・再処理を統合したプラントを建設する。このプラントは MOX-SF 処理を対象とし、COEX™ 法を速やかに導入し、その後他の先進的プロセスと置き換えることとする。COEX™ 法は、Gen-III プラントで、U-Pu を共抽出し、溶液の状態で保管し、Pu の単離はしない先進的保障措置(SG)対応である。

バックエンド技術と関連する技術革新は、原子炉概念と及び関連する燃料サイクルと整合し、調和したものであることを目指し、2006 年の “the Sustainable management of radioactive materials and waste” で要求されている先進的アクチノイド分離オプション沿って、La Hague 工場などの既存施設を使って Gen-IV 原型炉を想定した予備的な燃料製造の技術開発を開始している。

La Hague 工場 ①高速炉用 MOX ドライバー燃料製造 (プロトタイプ)

(U)PuO₂ : Pu 含有 ~20%

年間製造量 : 5~10 トン

②MA 燃料の実験的製造

MA の分離技術、遠隔装置によるペレットおよびピン製造

年間製造量 : 数 10kg

○ 研究開発と評価

SF と廃棄物処理に関する R&D は、以下の 3 つの評価軸 (マイルストーン) に沿って議会によって 3 年ごとに評価され、改定される。

Axe1 : 分離・変換

- ・ 2012 : Gen-IV の原子炉および燃料サイクル技術、市場導入可能性の評価
- ・ 2020 : Gen-IV プロタイプ高速炉の運転

Axe2 : HLW の地中処分

- ・ 2015 : 処分場建設に関する許可
- ・ 2025 : 処分開始

Axe3 : 超長期中間貯蔵

燃料サイクルシナリオは、以下の原子力発電システムの要求と整合するように R&D を進める。

- PWRs の燃焼度の向上
- 原子炉プラントの寿命延長
- UOX と MOX の燃焼度の同等化(parity)
- Gen-III(EPR)による古い原発の計画的な置き換え
- 多重(Multi-strata)シナリオでの Gen-IV の導入(2040 年)

このために CEA では、3 つの燃料サイクル戦略を研究中である。

- ① 第 1 段階での EPR による U、Pu リサイクルの最適化、第 2 段階での FR による U、Pu の混合利用 (出来れば Np も)。
- ② Gen-IV 炉での低い MA 含有量(3%)のドライバー燃料による MA の均質リサイクルの可能性。
- ③ Gen-IV 高速増殖炉の MOX ブランケット中、または ADS での高い MA 含有量(30%)を有する不均質サイクルの可能性。

○ 分離技術の開発

CEA では 90 年代から、PUREX 法を基本に、そこからの Np の分離と、Am、Cm を分離するための液・液抽出プロセス DIAMEX、SANEX の開発を進めており、2005 年に ATLANTE において、60GW/t の UO₂ 使用済み燃料 13kg を使った科学的フィジビリティ(scientific feasibility)実験を実施しており、次は、上記 3 つのプロセスの工場規模での評価に移る。3 つのプロセスは以下のように明らかに開発段階が異なることを考慮する。

- COEX™ 法は、工場規模での設計に導入されつつある Gen-III 再処理プラントでの分離法であり、市場の要求 (Pu の単離はしない、高いスループット、LWR と FR の MOX 燃料に対応できる高い性能) にも合致している。
- DIAMEX-SANEX 法は、Gen-IV システムでの均質サイクルを目指した長半減期核種(Am、Cm)の分離技術であり、COEX™ 法と合わせて利用することも想定する。

これらの R & D は、次のマイルストーンに沿って進める。

- 2009 年までに実験室規模での実証を行う。
- 3 つのプロセスの技術的な可能性評価は 2012 年までに実施し、その評価を踏まえて 2 つのパイロットプラントで工場規模の技術開発を行う。
 - ① Gen-IV 原型炉のドライバー燃料製造に供するためのプラントで、現実には COEX™ 法プラントになるものと予測される。
 - ② 「もんじゅ」および Gen-IV 原型炉で照射試験を行う MA 含有の燃料集合体の製造に供するためのプラント。

これらの技術開発は、長期的に 2040 年の商用の Gen-IV 高速炉導入のために保証される技術を開発することを目指す。

(2) 基礎研究と研究開発インフラ

フランスでは、原子力政策に沿ったR & Dを進めるため、Gen-II(既存軽水炉)、Gen-III(次世代軽水炉：EPR)、Gen-IV(高速炉等)で必要とされる基礎的な研究、プロジェクトのための目的研究、既存、及び将来の原子力技術を改良、革新、開発するための研究、および人材育成のための研究開発インフラのあり方を検討し、既存インフラの維持、新規インフラの整備(建設)を計画的に進めている。

こうした取り組み、考え方は、フランス一国のためになく、前述したようにEUの原子力政策の一部ともなっている。

研究炉（試験炉、臨界実験装置）の利用

- ・原子炉物理研究用 Zero Power Reactor : MINERVE、EOLE、MASURCA
PWR、ABWRでのPu利用
フランス PWR(Gen-II、GenIII)の支援
核変換の基礎研究
Gen-IVのための新たな概念の創生
- ・安全性研究炉 : CABRI
- ・中性子科学等のための研究炉 : ILL、OSIRIS
- ・材料試験炉 : OSIRIS、JHR
- ・教育、訓練用 : Zero Power Reactors
- ・高速原型炉 : PHENIX(2009年停止予定)

○ 研究炉（材料試験炉）

現在、EU域で稼動している Halden (ノルウェー)、OSIRIS(仏)、BR2(ベルギー)等の研究炉は、1960年前後に建設されたものである。このため、これらの炉の老朽化に対処するため新たな試験炉 JHR を、国際利用施設として Cadarache に建設中である。

JHR(Jules Horowitz Reactor)

- ・2014年稼動
- ・資金 500M€(2005年) CEA50%、EDF20%、AREVA10%、EU他(20%)
- ・出力 100MWt
- ・主な用途
 - 安全研究、寿命延長(aging& new plants)
 - 異常時、事故時の燃料挙動評価
 - Gen-III、Gen-IVの革新技術、安全性の評価
 - 人材育成・訓練

○ 安全性研究炉 CABRI

原子炉出力の急上昇時の燃料の健全性を確認することを目的とし、MOXを含む各種の燃料の性能向上に資する。

CABRI (CEA:Cadarache)

- ・初臨界 1963 年(現在、改造工事中)
- ・最大出力 25MW(定格時)
20GW(パルス運転時)、出力幅 10~80ms

○ 照射後試験施設

CEA サクレー研究所の OSIRIS(出力 70MW)に隣接して、照射材料の検査、試験のためのホットラボ施設 LECI、JHR に隣接して燃料を含む照射試料の大型ホットラボを新設中である。

LECI は、旧ホットラボに併設して、2005 年に新ホットラボを増強し、原子炉材料の PIE 機能のグレードアップを図っている。なお、LECI の顧客の多くは、EDF やアレバなどの民間である。

○ 人材確保

CEA、アレバ、EDF、大学が協力して、短期も含めて年間 1 万数千人の 教育・訓練を実施し、原子力人材の確保を図っている。