

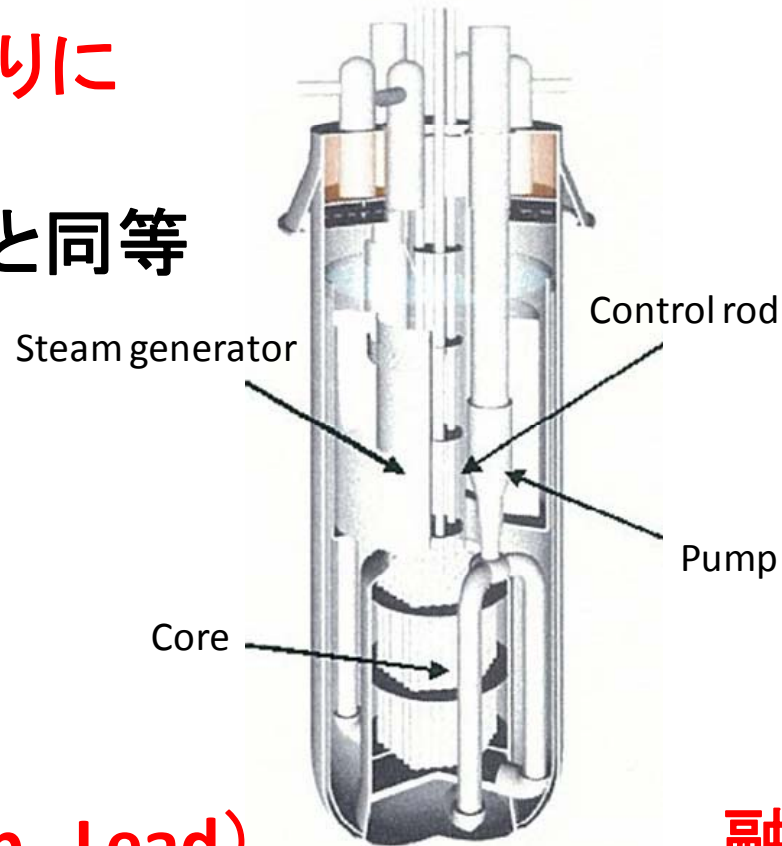
新型炉部会企画セッション
「GIF、第4世代炉国際フォーラムの現況」

(5) LFRの活動現況

東京工業大学
革新的原子力研究センター
高橋 実

鉛系液体金属冷却高速炉 Lead Alloy-Cooled Fast Reactor (LFR)

ナトリウムの代わりに
鉛系金属
持続性はSFRと同等



冷却材：鉛 (Pb, Lead)

鉛ビスマス (45%Pb-55%Bi) 融点125°C

融点327°C

Lead-Bismuth eutectic (LBE)

LFR研究開発の経緯

高速炉開発の当初から、冷却材として鉛や鉛ビスマス(LBE)は安全性や優れた中性子経済のために設計者の関心を集めていた。

理由 ・核特性と安全性に優れていること

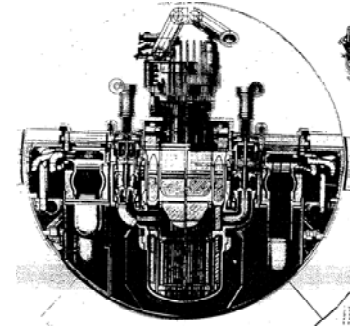
しかし、ナトリウムが高速炉用冷却材の第一候補となった。

理由・冷却材の材料腐食性
・増倍時間を短くするのが困難
(高速炉の基数を短期間に増やせない)

その後 潜水艦から小型炉、中大型炉、ADSへ



旧ソ連 潜水艦Alpha
LBE冷却熱中性子炉
8隻就航 優れた性能



中大型炉
(鉛冷却)
BREST-300,-1200
E.O.Adamov

小型炉
(LBE冷却長寿命炉心)
LSPR (東工大・関本博)
SVBR (露IPPE・V.V.Toshinsky)
STAR-LM (米ANL)

加速器駆動システム(ADS)
C. Rubbia(CERN)の提案
放射性廃棄物(MA等)の核変換処理

なぜ鉛か？ Gen-IVの目標に合致する 固有の安全性

良好な中性子特性 (散乱断面積、質量数が大きいため)

- ・低余剰反応度
- ・負のボイド反応度
- ・高い自然循環力 (広い冷却流路)

化学的に不活性

- ・No 火災・化学反応
- ・保有エネルギー最小

Pb, Pb-Bi(LBE): 顕熱のみ → 低圧・安定

水: 潜熱 + Zr反応 → 高温・高圧

Na: 化学エネルギー → 反応熱

Gen-IVの目標に合致する LFRの高い固有の安全性

(続き)

沸騰温度が高い

Pb 1737°C

Pb-Bi 1670°C

Na 882°C

→ 沸騰なし(+負のボイド反応度)

高比重

・炉心崩壊事故時

燃料ペレット浮上・分散 → 再臨界起こりにくい

UTOP, ULOF, ULOHSにおいても受動的に終息

Gen-IVの目標に合致する LFRの利点

- 小型化が容易
理由: 良好な中性子経済
中性子・ガンマ線の遮蔽効果
- 低環境線量
理由: ガンマ線発生源なし
SFRの場合 ^{24}Na
(高エネルギー γ 線、半減期 15h)
- 気泡による循環能力

LFRの課題

- Biから ^{210}Po (α 線源)の生成
- Pb, Biの高い腐食性
- 耐震性→中型炉まで 理由:高比重のため
- 流速の制限→ 2m/s 以下 理由:エロージョン防止
- 温度制約
 理由: Pbの融点 327°C → 運転温度 高い
- Biの埋蔵量
 Pb-Bi不足、高価 → 持続性も問題

LFR研究の世界的活発化

1990年代小型炉研究(関本, Zaki)



2000年代初頭

- 第4世代原子炉の候補
- アメリカNERI予算
- 日本 文科省公募
- 実用化戦略調査研究(サイクル機構)

東工大, 阪大, 京大, JNC, 原研, 電中研,
三井造船, メーカー

第4世代炉国際フォーラム(GIF)への関わり

当初

LFR-PSSC(暫定運営委員会)

Provisional System Steering Committee (PSSC)

- 日本側: 日本原子力研究開発機構

2006年以降 SFR+MOX 選択と集中

- LFR- SA(システムアレンジメント)締結せず
- プロジェクトレベルの参加のみ
- PSSC 東工大代理出席

GIF議長国として

- LFR覚書(MOU) 東工大署名

鉛系液体金属冷却高速炉(LFR) 原子力エネルギーシステムに関する覚書(MOU)

署名： 2010年11月22日(日欧)、2011年7月(露)

参加組織：

東工大 革新的原子力研究センター(CRINES)

EU 欧州委員会共同研究センター(JRC)

ロシア国営原子力企業「ロスアトム」

対応

- 東工大CRINES にGIF-LFR専門委員会設置
- 国内鉛系液体金属研究グループの調査

LFR-PSSC(暫定運営委員会)の議論

Draft System Research Plan (SRP)

LFR-PSSC 欧米日 常時参加

2007年策定

冷却材:鉛 Reference, 鉛ビスマス Backup

理由 Bi→²¹⁰Po生成, Bi埋蔵量少ない

Dual-Trackエネルギー供給システムの提案

EU ELSY (中型鉛冷却炉, 1500 MWt)

米国 SSTAR (小型鉛冷却炉, 19.8 MWe)

実証炉:単一炉に一元化

(demo, or technology pilot plant: TPP)

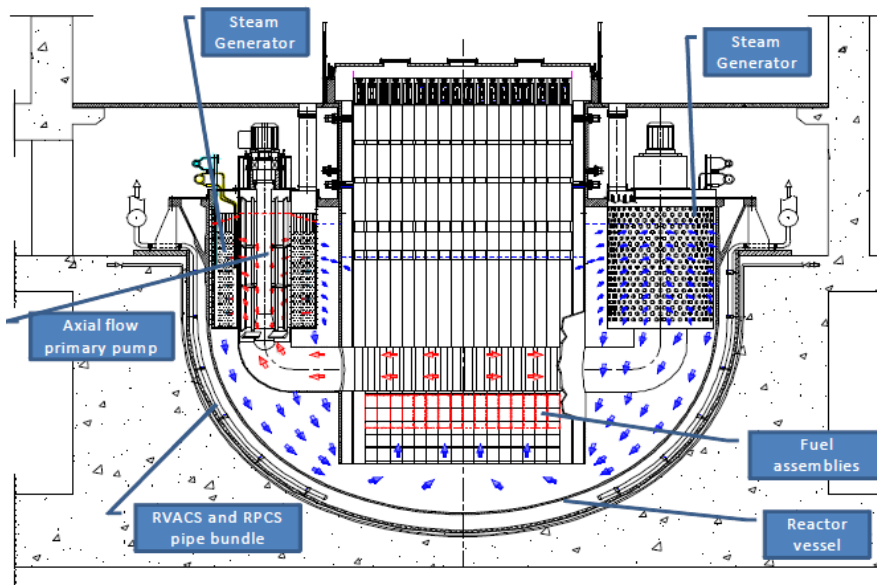
日本(東工大)

LSPR、PBWFR、(CANDLE)

韓国

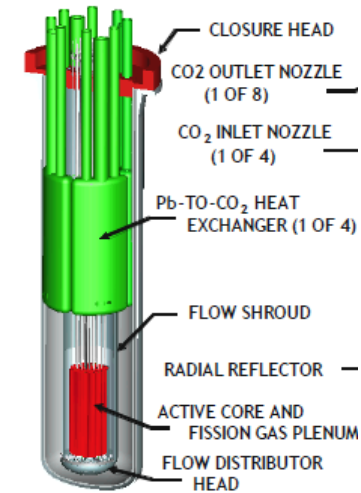
PEACER、BORIS

Dual-track Viability Research Program pursuing two separate LFR concepts



集中立地 中型炉
ELSY (630MWe)

先進国用(送電網に接続)



分散型小型炉

SSTAR (20MWe)

遠隔地(離島・僻地)、
開発途上国用(核不拡散)

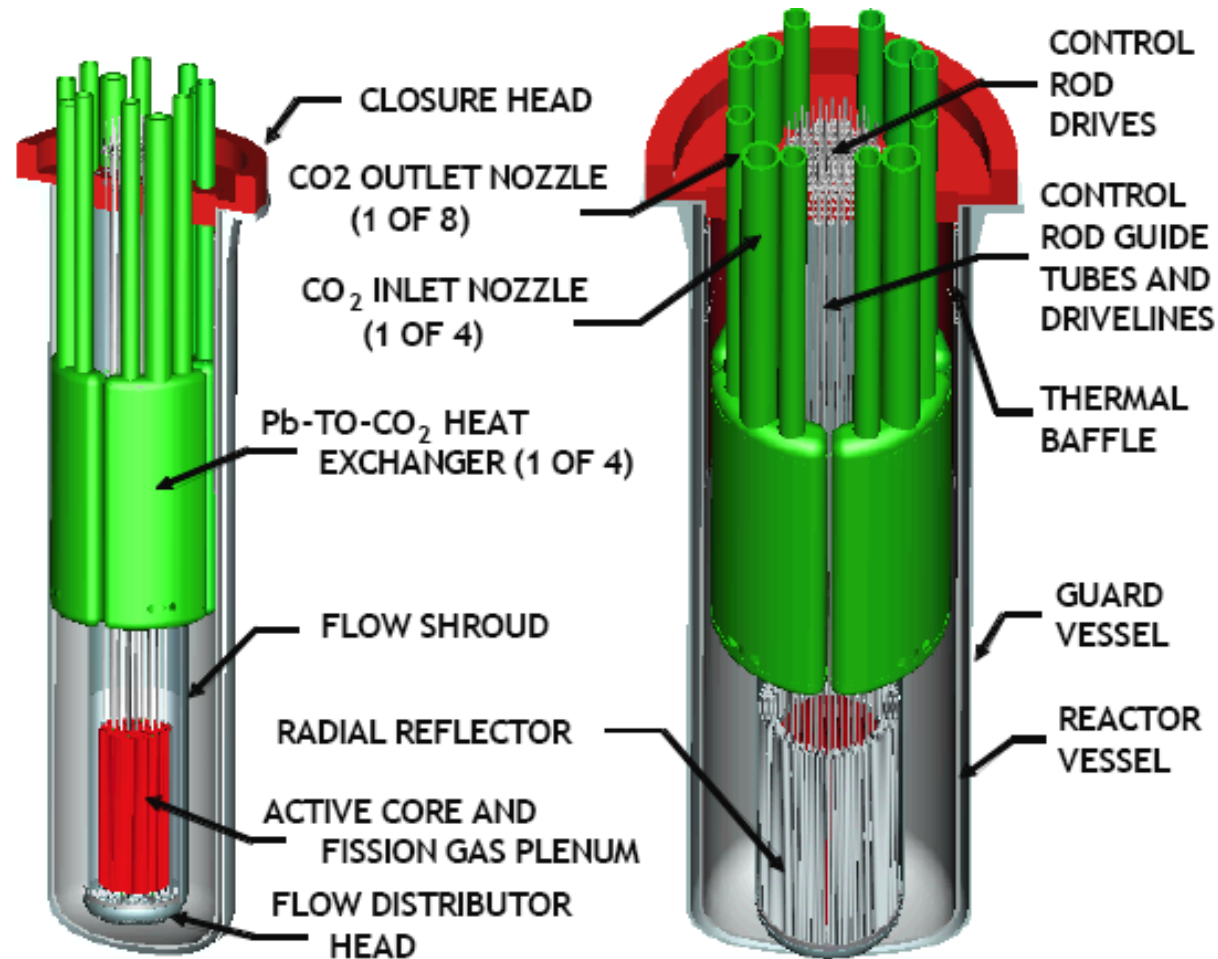
運搬可能

発電・水素・熱供給

固有安全(自然循環冷却)

長寿命炉心(15-30年)

Small Secure Transportable Autonomous Reactor (SSTAR) 20MWe, US-DOE



小型モジュール・プール型炉

熱出力: 125 ~ 400 MWt, 低熱出力密度

冷却材: 鉛、LBE

燃料: 金属、窒化物、U, Pu, MA, LLFP, ブランケットなし

燃料カートリッジ/カセット 工場生産、原子炉輸送, 返還

サイトに燃料交換機構なし

燃料交換間隔: 15 ~ 30年 長寿命炉心

交換器、電磁ポンプ内蔵)の輸送

サイトに燃料サイクル施設なし

一次系自然循環冷却可能

受動的崩壊熱除去系・受動的格納容器冷却

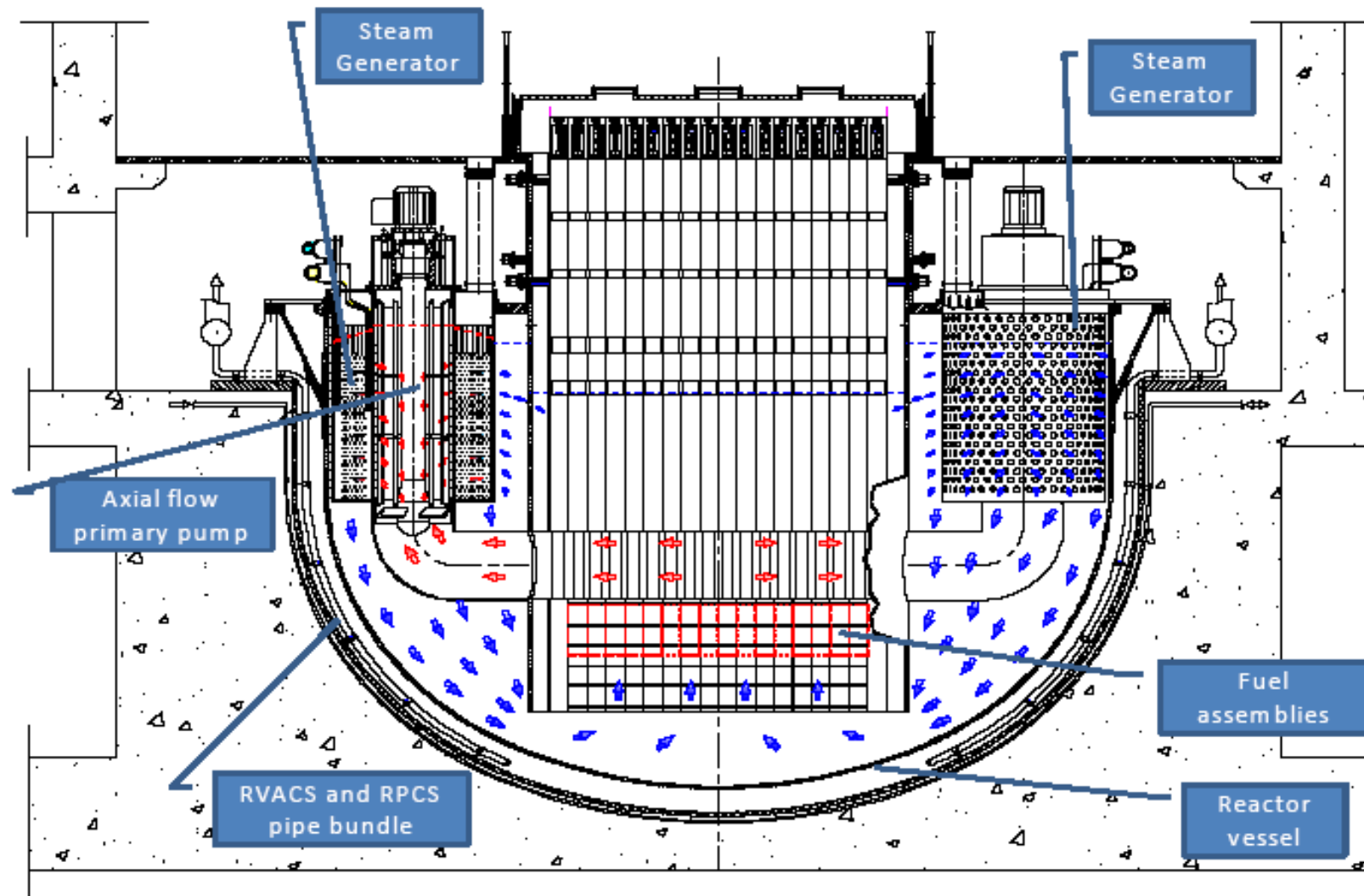
簡素化設計 (ポンプ、中間熱交換器なし)

燃料カートリッジ/モジュールと蒸気発生器の機械的結合なし

単純な反応度制御系 (反射体移動機構)

BOPの安全機能なし

European Lead-cooled System (ELSY) 630MWe, FP6 of Euratom

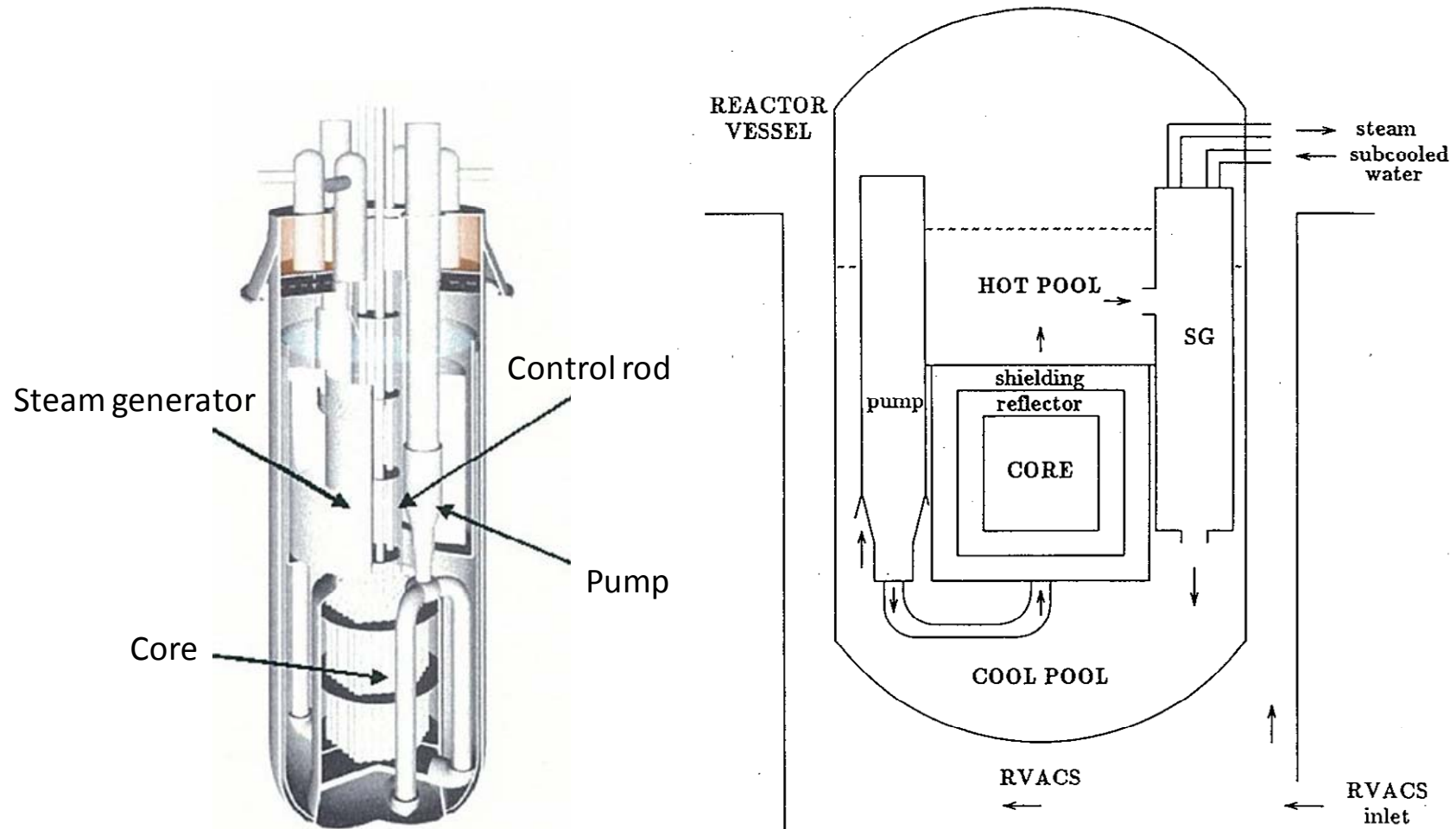


	SSTAR (15-30y)	ELSY
電気出力 / 熱出力 (MW)	19.8 / 45 (→180 / 400)	630 / 1500
転換比	約1	
熱効率 (%)	44	42
一次冷却材	鉛	鉛
一次系循環	自然循環	強制循環
崩壊熱除去系一次側循環	自然循環	
炉心入口温度(°C)	420	400
炉心出口温度(°C)	567	480
燃料	窒化物	U-Pu酸化物
燃料被覆材	Si添加フェライト・マルテンサイトステンレス鋼	
被覆材最高温度(°C)	650	550
燃料棒直径 (mm)	25	10.5
炉心高さ/直径 (m)	0.976 / 1.22	0.9 / 4.32
一次系循環ポンプ	なし	
作動流体	超臨界CO2 (20MPa, 552°C)	超臨界水蒸気 (18MPa, 450°C)
崩壊熱除去系	炉容器空冷、炉内直接冷却	

東工大の分散型小型炉

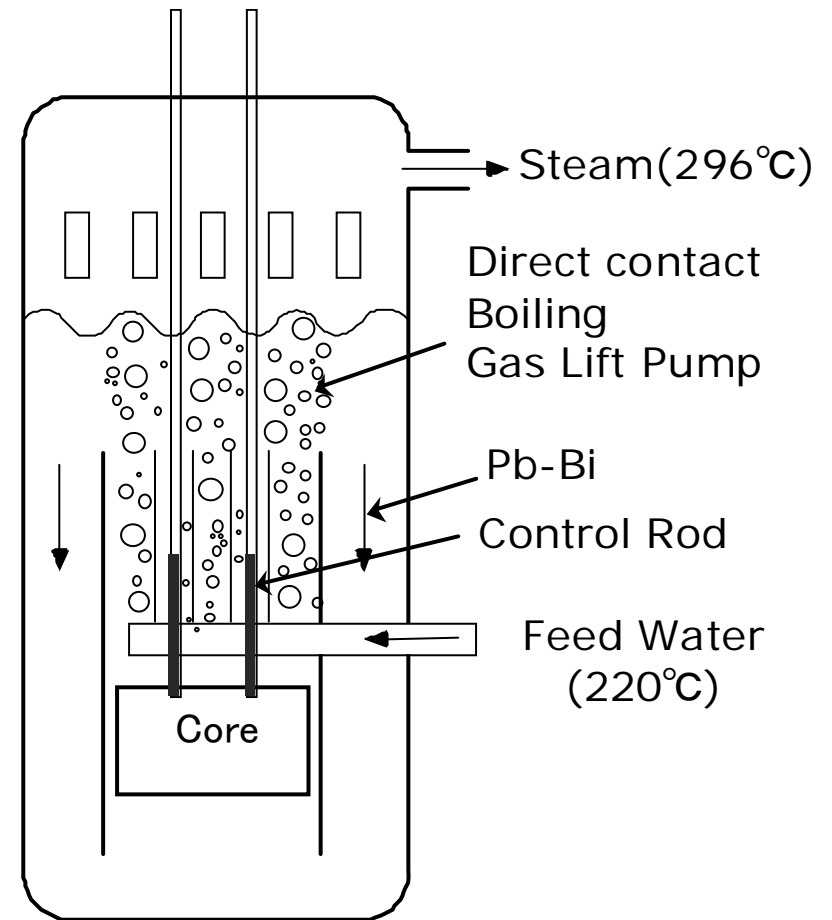
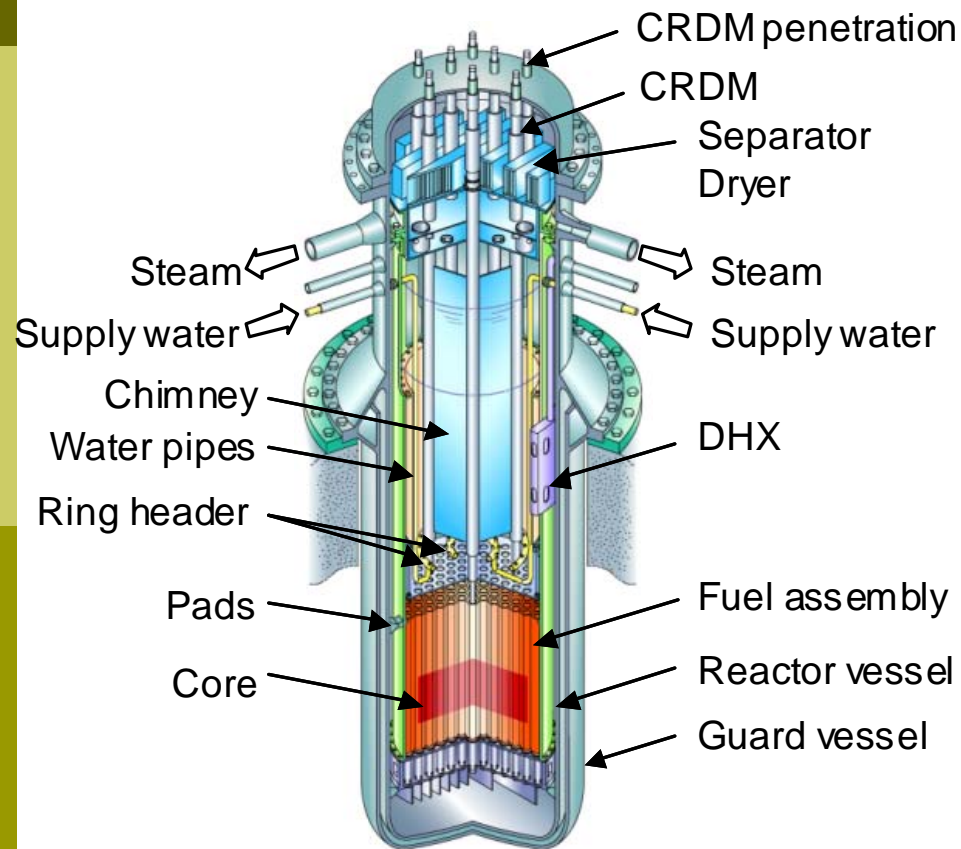
LSPR (53MWe)

(LBE-cooled long-life safe simple small portable proliferation resistant reactor)



PBWFR (150MWe)

(Pb-Bi-cooled direct contact boiling water fast reactor)



	LSPR	PBWFR
出力, 熱/電気 (MW)	150 / 53	450 / 150
熱効率 (%)	35	33
炉心, 直径/高さ (m)	1.652 / 1.08	2.78 / 0.75
燃料棒直径 (mm)	10	12
P/D, 内側/外側	1.12 / 1.18	1.3
線出力 (W/cm)	51.9 (平均)	363 (最高)
ポンプ, 形式/基数	機械式 / 2	ガスリフト式 / 1
温度, 入口 / 出口 (°C)	360 / 510	310 / 460
冷却材流量 (t/h)	12,300	73,970
蒸気発生器, 形式/基数	Serpentine tube / 2	直接接触式 / 1
温度, 給水/蒸気 (°C)	210 / 280	220 / 296
蒸気圧力 (MPa)	6.47	7.0
炉容器, 直径/高さ (m)	5.2 / 15.2	4.69 / 19.8
燃料交換期間 (y)	12~15	10

各国のLFR開発の動向

Euratom

第5回Frame Program 未臨界炉ADSシステム

第6、7回Frame Program LFR臨界炉を含める

第7回Frame Programにおいて

材料研究プロジェクト 2008年2月開始

GETMAT (Generation IV and Transmutation Materials)

目的

- ・9-12 Cr F/M鋼の改良
(PIEプログラム: 関連照射実験の評価)
- ・ODS合金の開発と特性評価
- ・ODS・F/M鋼の接合・溶接技術の高度化
- ・腐食防護層の開発と明確化
- ・モデル改良と実験による妥当性評価

Euratom 中央設計チーム (CDT)

予算 **2012年春まで** 6 Million Euro (**6.4億円**)

ミッション **未臨界・臨界モード**で運転するための
FASTEF/**MYRRHA**詳細設計

(The European Technology Pilot Plant)

Fast Spectrum Transmutation Experimental Facility

LFR : Pb-Bi冷却, 熱出力100 MWt, 送電線への接続なし
ADS (加速器駆動未臨界) または臨界炉

運転目的

- 柔軟かつ高中性子束の高速スペクトル照射施設として運転
- 核変換用試験装置の役割
- LFR技術の実証に寄与

CDT – Central Design Team

参加機関

1(調整) Studiecentrum voor Kernenergie/
Centre d'étude de l'Énergie
Nucléaire ベルギー
2 Forschungszentrum Karlsruhe ドイツ
3 no participant
4 Ansaldo Nucleare S.p.A. イタリア
5 Ente per le nuove Tecnologie l'Energia e
l'Ambiente イタリア
6 no participant
7 Empresarios Agrupados スペイン
8 AREVA NP S.A.S. フランス
9 Centre National de la Recherche
Scientifique フランス
10 Centro de Investigaciones Energéticas
Medioambientales y Tecnológicas スペ
イン

11 Sener Ingeniería y Sistemas S.A. スペイン
12 AREVA NP GmbH ドイツ
13 Adaptive Predictive Expert Control S.L.ス
ペイン
14 Oxford Technologies Ltd イギリス
15 Forschungszentrum Dresden-Rossendorf
独
16 Instituto Tecnológico e Nuclear ポルトガ
ル
17 Nuclear Research and Consultancy
Group オランダ
18 Universidad Politécnica de Madrid スペ
イン
19 UPV スペイン
20 CRS4 イタリア

Euratom プロジェクト

共同ネットワークHeLiMnet の形成

液体重金属ネットワーク Heavy Liquid Metal network

目的

- ・液体重金属 (HLM) 技術に関する情報の普及
- ・既存の液体重金属に関する知識の確認・評価
- ・液体重金属技術研究の調整
- ・LFR, ADS、SFR開発のSRA実施調整

the Strategic Research Agenda

Matter – 材料試験

Adriana – 将来の実験活動・必要施設の検討

LEADERプロジェクト

期間：2010年4月～2013年3月

予算：6 Million Euro（6.4億円）

The Lead-cooled European
Advanced Demonstration Reactor

目的

- ・大型LFRの設計の完了
- ・縮小demonstratorの概念設計開発

LEADERプロジェクト機関名

	略称	国名
Ansaldo Nucleare S.p.A.	ANSALDO	伊
Akademia Górniczo-Hutnicza	AGH	波(ポーランド)
Commissariat à l'Energie Atomique	CEA	仏
Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Ricerca Tecnologica Nucleare	CIRTEN	伊
MERIVUS (company of Luciano is joining the project – Contract amendement with EC in preparation)		
Empresarios Agrupados	EA	西(スペイン)
Ente per le nuove Tecnologie l'Energia e l'Ambiente	ENEA	伊
Forschungszentrum Karlsruhe	KIT-G	独
Institute for Nuclear Research	INR	ルーマニア
Joint Research Centre of the European Commission	JRC	欧州
Royal Institute of Technology-Stockholm	KTH	スウェーデン
Nuclear Research and Consultancy Group	NRG	蘭
Paul Scherrer Institut	PSI	スイス
Studiecentrum voor Kernenergie/Centre d'étude de l'Energie Nucléaire	SCK-CEN	白(ベルギー)
Servizi di Ricerche e Sviluppo	SRS	伊
Ustav Jaderneho Vyzkumu Rez, a.s. (Nuclear Research Institute Rez, plc.)	UJV	チェコ
Università di Bologna	UNIBO	伊

EUのLFR開発ロードマップ

欧州持続的原子力産業案

European Sustainable Nuclear Industrial Initiative (ESNII)

SFRの代替炉

ETPP(European Tech. Pilot Plant)(50~100 MWt)

設計と建設許認可獲得

2023年 MYRRHA全出力運転

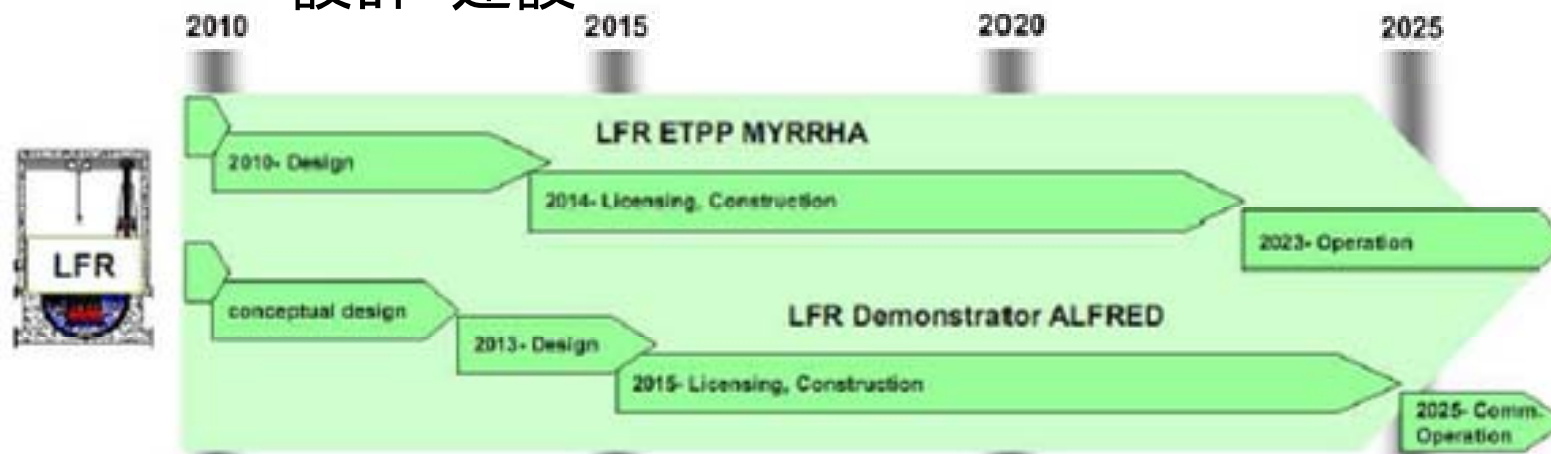
2015年~2025年 LFR Demonstrator "ALFRED"(約100 MWe)

設計と建設許認可獲得、送電系接続

運転により安全性と廃棄物最小化の実証

2025年~2030年 LFR Pilot Plant(約600MWe)設計・建設準備

設計・建設



ESNII 2.1 LFR支援R&D計画

- 材料改良**: 炉容器用鋼材、蒸気発生器用耐食材料、燃料被覆材・燃料構造材用保護コーティング、機械式ポンプインペラー用特殊材料
- 燃料開発・改良**: MOXドライバー燃料、新型MA含有燃料、鉛-燃料相互作用
- 重金属技術**: 鉛純化・濾過技術、酸素・化学制御
- 機器開発**: 安全棒・制御棒、熱交換器、供用期間中検査・補修技術
- モデル・ツール開発・研究**: 核・熱流動帰還、炉心安定性、即発臨界に至らない反応度余裕、鉛スロッシングに対する構造材の応答と耐性
- 大規模総合試験**: 主要システムの挙動把握(特に許認可のため)、重要機器の性能・耐久性実証、燃料集合体内熱流動ベンチマーク
- 零出力装置Guinevere 運転開始(2010年)**: 炉心設計改善、設計不確定の低減化(臨界質量、出力分布、反応度係数)

ESNII コスト評価

ESNII-2 (LFR)

LFR ETPP MYRRHA	960 M€	(1018億円)
ALFRED Demonstrator	1000 M€	(1060億円)

ESNII-4 (インフラ支援)

Supporting infrastructures

U-Pu燃料製造施設	600 M€	(636億円)
原型燃料製造施設	450 M€	(477億円)
高速中性子スペクトル照射施設(MYRRHA)	960 M€	(1018億円)
他の実験施設	600 M€	
研究実施予算(上記施設)	1000 M€	(1060億円)

10年間100 M€/yr

ESNII-1 (SFR), ESNII-2 (LFR), ESNII-3 (GFR)含む

ESNII-1 ~4 総額 10 810 M€ (**1兆1459億円**)

ロシアプレス発表

2010年7月30日 プーチン首相

高速炉を今後10年間の優先技術と位置づける。

2010年より 新原子炉建設に予算投入

53billion rubles (1290億円)

建設計画

2015年までに LBE冷却小型高速炉

SVBR-100 (100 MWe)

(Svintsovo-Vismutovyi Bystryi Reaktor)

酸化物燃料

2020年までに 鉛冷却高速炉BREST-300 (300 MWe)

窒化物燃料

ロシア国営原子力企業ロスアトムの計画

State Atomic Energy Corporation "Rosatom"

連邦目標プログラム

「2010～2015年及び2020年までの次世代原子動力技術」

federal target program Nuclear Power Technologies of New Generation for 2010-2015 and until 2020”.

プログラムのstate customerの決定

連邦予算案 110.428billion rubles (2783億円)

SC Rosatom ドラフトプログラム提出 政府審査

ロシア原子力の問題点

- ・使用済燃料と放射性廃棄物の増加
- ・非効率な天然ウラン資源の利用
- ・ロシア原子力の科学的優先度、世界市場における原子力製品の競争力の低下の可能性

解決策

- ・高速炉を基礎とする次世代原子力技術と核燃料閉サイクルの開発強化

ロシア国営原子力企業ロスアトム の計画

State Atomic Energy Corporation “Rosatom” 続

第1段階 (2010-2014)

- ・LFR SFRの設計
- ・U, Pu酸化物燃料製造設備の稼働
- ・詳細建設設計

多目的高速中性子研究炉、炉心診断用ニュートリノ検出器、
分散型複合材料生産施設

第2段階(2015-2020)

- ・建設
LFR パイロット実証炉
多目的高速中性子研究炉MBIR (既存炉と置換)
- ・産業界に高速中性子炉用濃縮燃料製造の委託
- ・核燃料閉サイクル試験用パイロット実証施設の建設完了

2010～2015年と2020年まで

RUB128.3bn (3118億円)

連邦予算 RUB110.4bn (研究開発RUB51bn、資本投資 RUB59.4bn)

追加期待予算 RUB17.9bn.

GIF-LFRの今後の方針

我が国のこれまでの**研究レベルは高い**が、現状は不活発である。

- LFR各機関の研究開発の把握
国際会議, ワークショップ
- LFR各機関の政策の動向の把握
- **LFR暫定システム運営委員会**
(システムリサーチプランの準備)

- 課題
国内LFR開発研究の活性化
鉛系液体金属研究ネットワーク構築
(ADS、核融合LiPbグループ)

EU、(ロシア)



国内
鉛合金利用技術研究

GIF-LFR覚書
(東工大CRINES)

高速炉LFR
(Pb, PbBi)

核融合炉ブランケット
LiPb

加速器駆動
システムADS
(PbBi)

金属精錬
(PbBi)

国内の鉛系金属関係の研究

システム	核融合炉 ブランケット	高速炉 LFR	加速器駆動 システムADS	金属精錬
流体	LiPb	PbBi, Pb	PbBi	PbBi
研究 項目	中性子工学	炉概念	炉概念	
	核データ			
			炉物理実験	
	材料腐食(材料開発)			
	水素センサー	酸素センサー		
	水素同位体・Pb中 物質活量係数	Po・不純物拡散		
		Na化学反応		
	熱流動・MHD流動			
	音響・超音波流量計・UVP			

国内 鉛系液体金属利用技術 研究機関

システム	核融合炉	LFR	ADS	金属精錬
流体	LiPb	PbBi, Pb	PbBi	PbBi
研究 項目	LiPb中性子工学 (阪大)	炉概念(東工大, JAEA)	炉概念(JAEA, 東工 大)	/
	核データ(東工大, 東大, 京大, JAEA)			/
	/	/	炉物理実験(JAEA)	/
	材料腐食(東工大, JAEA, 三井造船, 茨城大, 電中研, 京大, 東大, 東海大, 核融合 研, 助川電気, 島津総合分析試験センター)			
	材料開発(JAEA, 京大, JAEA, コベルコ科研, 北大, 東工大, 名大物材機構, 電中研)			
	水素センサー (NIFS, TYK, 東海 大, 九大)	酸素センサー(東工大, 茨城大, 阪大, JAEA, 助川電気工業), 酸素濃度制御(東工大, 東海大)		
	/	Na化学反応(JAEA)	/	/
	水素同位体(京大, 東大, 九大, TYK, NIFS, 東海大)	Po(東工大, JAEA)・不純物拡散(東工大)		
	熱流動(JAEA, 東工大, 京大, 神戸大, 阪大, 電中研, 茨城大, 九大) MHD流動(阪大, 京大, NIFS, 東海大, 東工大, 茨城大, 助川電気, JAEA)			
	音響・超音波流量計(JAEA)・UVP(茨城大, 京大, JAEA)			

Appendix: Acronyms

ADS: Accelerator Driven Systems

ALFRED: Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator

ASTRID: Advance Sodium Technological Reactor
for Industrial Demonstration

EERA: European Energy Research Alliance

ETPP: European Test Pilot Plant

GFR: Gas cooled Fast neutron Reactor

GIF: Generation IV International Forum

LFR: Lead cooled Fast neutron Reactor

M€: million Euro

MWe: Megawatt electrical power

MWth: Megawatt thermal power

SFR: Sodium cooled Fast neutron Reactor

SNETP: Sustainable Nuclear Energy Technology Platform