

第 4 世代 (Generation IV: GEN-IV) 原子力発電システムについて

平成 12 年 7 月 4 日

エネルギー総合工学研究所

プロジェクト試験研究部

松井 一秋

核燃料サイクル開発機構

システム技術開発部

鈴木 聖夫

1. はじめに

米国次世代原子力発電システムの開発計画の策定に関して、本年 1 月から、後述する一連の会議に参加した。会議での入手情報などを基に最近の米国の動向を紹介すると共に会議の概要を報告する。

2. 米国における次世代原子力発電システムの開発計画の策定

1) 今なぜ第 4 世代原子力発電システムか

GEN-IV とは

十分なエネルギー供給、世界の原子力技術、産業のリーダーの観点から、第 4 世代の開発を言い出したのは米国エネルギー省 (DOE) 原子力エネルギー・科学技術局マグウッド局長で、1999 年の米国原子力学会 (ANS ミーティング) であったといわれる。第 1 世代とは初期の原型炉的な炉で、 SHIPPING PORT (PWR)、ドレスデン (BWR) など。第 2 世代とはその後の商用炉群で、PWR、BWR の軽水炉、CANDU 重水炉、ロシアの軽水炉である VVER や RBMK。第 3 世代は第 2 世代の改良型で、大型化による経済性追及の ABWR、EPR や静的安全性を取り入れた中型の AP600 など。

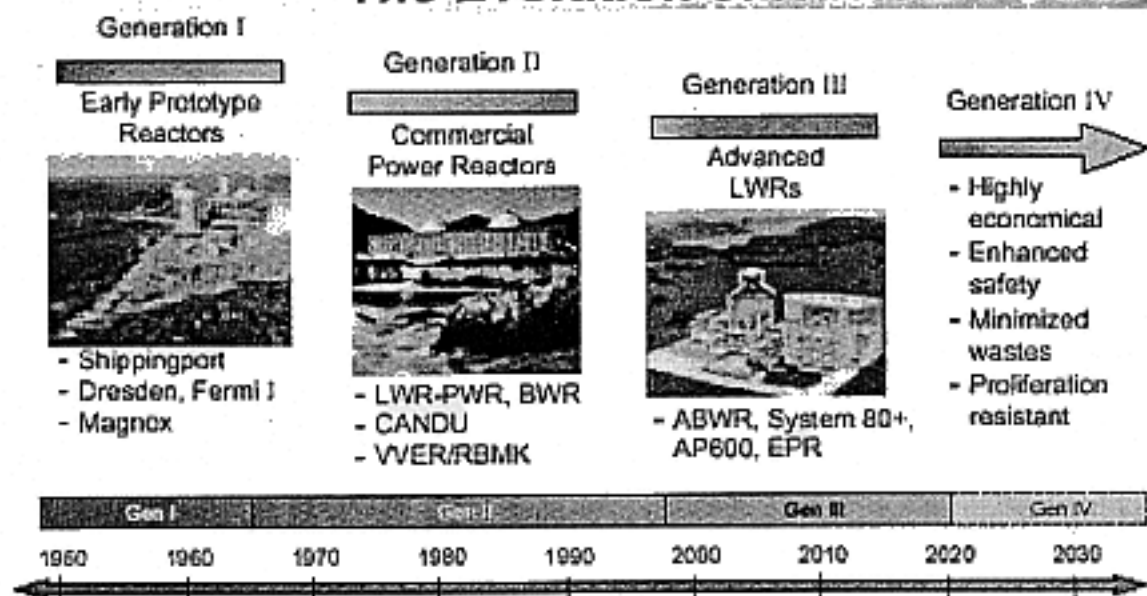
第 4 世代はその次の世代のシステムであり、以下の特徴をもつものとしている。

- ・天然ガス火力発電と競合できる経済性を持つこと。
- ・より高度な核拡散抵抗性をもつこと。
- ・より高度な安全性を持つこと。
- ・廃棄物の負担を最小化するものであること。

DOE では、2020 年ごろを目標に、電力需要急拡大が確実視されるアジア諸国の市場を対象として、核拡散の恐れと安全性の心配の少ないシステムを米国主導のもとによる国際協力で開発することができるならば、米国の産業技術の維持・発展ならびに核拡散上からもイニシアティブを取ることがで

きると考えていたようである。核拡散抵抗性の強化は米国の識者や議会では原子力再興にとっての必須の条件と目されている（核不拡散法）。また国立研究所群にとっては原子力関連研究の生き残りゲームという側面もある。

The Evolution of Nuclear Power



背景

米国の原子力発電実績は近年良好を極め、電力自由化の中で原子力発電所の価値も上がっているが、1970年代から新規発注がないことから中長期的には原子力発電のシェア低下が危惧されており、温暖化ガス発生抑制、原子力技術力の維持・発展という観点からの施策の必要性が指摘されていた。（大統領科学技術諮問委員会；PCASTの勧告，1997）

PCASTの勧告を受け昨年度予算（FY1999）より、革新的原子力研究の促進を目的として提案公募による原子力研究イニシアティブ（NERI）が始まっている。（今年度の新規開始テーマ一覧を添付資料3）に示す。）この他にも、既存の発電所については主としてプラント寿命延長を目的とする原子力発電プラント最適化プロジェクト（NEPO）が始まっている。（図2米国DOEの原子力研究開発予算参照）

即ち、大統領科学技術諮問委員会（PCAST）の勧告に基づき、米国（DOE）による原子力開発が確実に動き始めていると言える。その背景を次のように考えている。

- ・米国にとっても、また今後の世界にとっても、原子力は重要であり、米国の原子力技術の維持・向上が必要である。

- ・米国内で原子力を専攻する学部学生の減少が顕著であり、次世代の人材育成のために学生にとって魅力ある開発プロジェクトを計画する必要がある。
- ・原子力開発や核不拡散で米国の主導権を保持し、世界の原子力開発をリードすることが米国にとって重要である。

2) 次世代原子力発電システムの開発ロードマップの作成

DOEは今年10月を目途に、下記の活動を集大成して次世代原子力システム開発のロードマップを作成しようとしている。(図1参照)

- ・原子力エネルギー研究諮問委員会 (NERAC) による長期研究開発計画の策定

座長: J. Ahearne 氏 (Duke 大学)、国内の研究インフラの整備計画を含む長期研究開発計画の策定。昨年12月に国内関係者のみでワークショップを開催し、開発目標などを議論した。6月中に報告書を取りまとめる予定。

- ・民生用原子力利用の核拡散抵抗性向上のための技術的可能性 (TOPS)

註1、TOPS: Technical Opportunities for Proliferation Resistance of Global Civilian Nuclear Power Systems)

座長: J. Taylor (EPRI)、原子力エネルギー研究諮問委員会 (NERAC) の下に設置されているTOPSタスクフォースでは、第4世代原子力発電システムの目標のひとつである核拡散抵抗性のある原子炉及び燃料サイクルについて、核拡散抵抗性を向上する原子炉技術及び燃料サイクル技術とその研究開発計画、国際協力が可能な開発項目を勧告する。

8月までに報告書を取りまとめる予定。

- ・第4世代原子力発電システム (GEN-IV) の活動

第4世代原子力発電システム (GEN-IV) の開発目標、技術開発課題の検討、及び関連する多国間協力のあり方についての勧告を目的とする

3) GEN-IV, TOPSの経過と今後の予定

- (1) 第4世代原子力発電システム政府レベル国際ワークショップ (平成12年1月27日、28日、ワシントンD. C)

参加国: 日、英、米、仏、韓、加、ブラジル、アルゼンチン、南ア
オブザーバー: OECD-NEA, IAEA

⇒共同声明-1 (添付資料1)

- (2) 民生用原子力利用の核拡散抵抗性向上のための技術的可能性 (TOPS)」に関するタスクフォース (3月10日、ワシントンD. C.)
参加国：日、米、仏
⇒米ロ2国間協力交渉の現状紹介、核拡散抵抗性の属性評価の検討
- (3) 「民生用原子力利用の核拡散抵抗性向上のための技術的可能性」に関する国際ワークショップ (3月29日～30日、ワシントンD. C.)
参加者：日、米、仏、IAEA、総勢約60名
⇒核拡散抵抗性向上に関する研究開発課題及び国際協力のテーマ検討
- (4) 「第4世代原子力発電 (GEN-IV) システムに関する国際上級技術専門家会合」 (4月5日～7日、ワシントンD. C.)
参加国：日、米、仏、韓、加、アルゼンチン
⇒各国の次世代炉開発の状況 (添付資料4)
国際協力の進め方を討議⇒共同声明-2 (添付資料2)
- (5) 第4世代原子力発電 (GEN-IV) システム国際ワークショップ (5月1日～3日、ベセスダ)
参加者：日、米、仏、韓、加、ブラジル、アルゼンチン、南ア、中国、英、IAEA、EC、総勢約100名
⇒開発目標、要件と特性レベルを討議 (ドラフトレポートレビュー中)
- (6) 民生用原子力利用の核拡散抵抗性向上のための技術的可能性 (TOPS)」に関するタスクフォース (6月15日、16日、シカゴ)
参加国：日、米、仏
⇒各種システムの核拡散抵抗性の特徴評価と開発課題の審議 (添付資料5)
- (7) 5月の第4世代国際ワークショップ報告書 (第4世代原子力システムの要件と特性) 完成 (6月26日予定)
- (8) TOPSタスクフォースドラフトレポート (7月中旬)
- (9) 第4世代原子力発電 (GEN-IV) システムに関する政策及び上級技術専門家会合 (本年8月下旬を目途に、DOEが主催、韓国で開催予定)
- (10) 第4世代原子力システム技術開発に向けてのロードマップの作成 (本年10月を目途)

このロードマップによる予算獲得が成功すると、米国会計年度 (FY) 2002年度、すなわち2001年10月からの予算執行ということになる。米国は拡大NERI計画 (International NERI、FY2001では7M\$を要求しているが下院段階ではゼロ査定) などともに国際協力、開発の分担を模索すると

考えられる。

4) 日本の対応状況

1月のGEN-IV政府レベルワークショップには、相澤 JNC 理事、落合氏（原研）、松井（エネ総工研）と在米大使館の岡谷一等書記官、等が参加。その後、DOEから第4世代原子力発電システム技術専門家会議ならびにTOPSタスクフォースへの参加については、鈴木聖夫（JNC、大洗）と松井一秋（エネ総工研）の2名を代表として対応している。

GEN-IVは米国における原子力の復活に向けたステップと捉え、米国の動きに協力することはわが国の国益にもなると考えられる。

日本の考え方を積極的に米側に伝え、日本の計画とも整合する米国の研究開発計画の実現に努力すべきと考える。

TOPSに関しては、核拡散抵抗性強化に特化した主張は少なく、核拡散抵抗性を評価する手法の開発が必要である、経済性が第1の目標であり核拡散抵抗性の強化により経済性が損なわれないようすべきであるなど、妥当な意見が多い。しかしながら、米国には、プルトニウムを悪とみなし、核拡散抵抗性の強化を第4世代原子力システムの最優先の要件と考える人々があり、議論の行く末を見極める必要がある。

今後、これらの検討に係わる報告書の内容がわが国の高速炉を中心とするリサイクル政策の障害にならないよう対応していくべきと考える。

3. 所感

- 1) 経済性、核不拡散、安全性、廃棄物の4つの目標を掲げて出発したGEN-IVはNERIの公募研究、昨年6月にローレンスリバモア国立研究所（LLNL）で開催された核拡散抵抗性向上の新しいアイデアに関するワークショップ、ANSでのGEN-IVの発表を見た限りでは、特定のコンセプトとしての今後の開発目標の目玉を未だ見出し得ていない。
- 2) GEN-IVでは、当初は核拡散抵抗性強化を主眼として、開発途上国向け輸出用の長寿命炉心小型炉の開発という印象が強かったが、本年初めのワークショップなどへの我が国など米国以外の国々の参加により、より広い概念としての次世代原子力システムを目指すものに方向転換がなされたようである。
- 3) GEN-IVが、どれだけ魅力のある開発目標を設定できるか、或いはその国際協力の下地ができるか、であるが、結局、FBRを脇において、将来目

標の設定に苦吟しているようにも見える。若者が参加したくなるような夢のある開発目標の設定を期待したい。

- 4) 国により、開発のステージが異なり、各国が考える次世代炉には差がある。これを、2～3の共通目標概念に絞るのは難しい仕事である。将来目標に向けた共通のキー技術を摘出し、基礎基盤技術と共に、国際協力の目玉にするのが良いのでは、と考える。

まずは、緩やかな連合体の枠組みの中で、2国間協力など、出来るところから国際協力を進めるのが現実的方策であろう。

- 5) GEN-IVについての米国内のコンセンサスが大統領選挙前に得られるのか、疑問視し、クールに対応する人も多いと聞いている。

NERIなどは基礎的な研究シーズの発掘といった色彩が強く、主として大学の研究・教育能力の維持・拡大が主眼であり、米国内国研ならびに産業の技術開発能力の維持・拡大という観点からは物足りないものである。米国内の予算の獲得や拡大にわが国など海外諸国の参加が有効であるなら、積極的に協力すべき、と考える。

- 6) 米国がリサイクル路線に戻るとしても、リサイクルシステムが現行のワンス・スルーと同等以上の核拡散抵抗性を有することが詳細な評価により確認されることが条件であると言われている。核拡散抵抗性を向上するリサイクルシステムの提案やその核拡散抵抗性の評価手法の開発などに関して、わが国の考え方を提示し、米国との協力関係を主体的に構築することも期待される。

図表リスト

図 1 次世代原子力発電システムの開発計画の策定工程

図 2 米国DOE原子力研究開発予算

添付資料 1 GEN-IV政府レベル国際ワークショップ共同声明

添付資料 2 GEN-IV国際上級技術専門家会議共同声明

添付資料 3 NERI 2000年度新規テーマ一覧

添付資料 4 第4世代原子炉候補

(国際上級技術専門家会議(2000年4月)などより)

添付資料 5 各種新型概念の技術的特徴と核拡散抵抗性

(TOPSタスクフォース(2000年6月)資料などより)

Planning for Next Generation Nuclear Energy

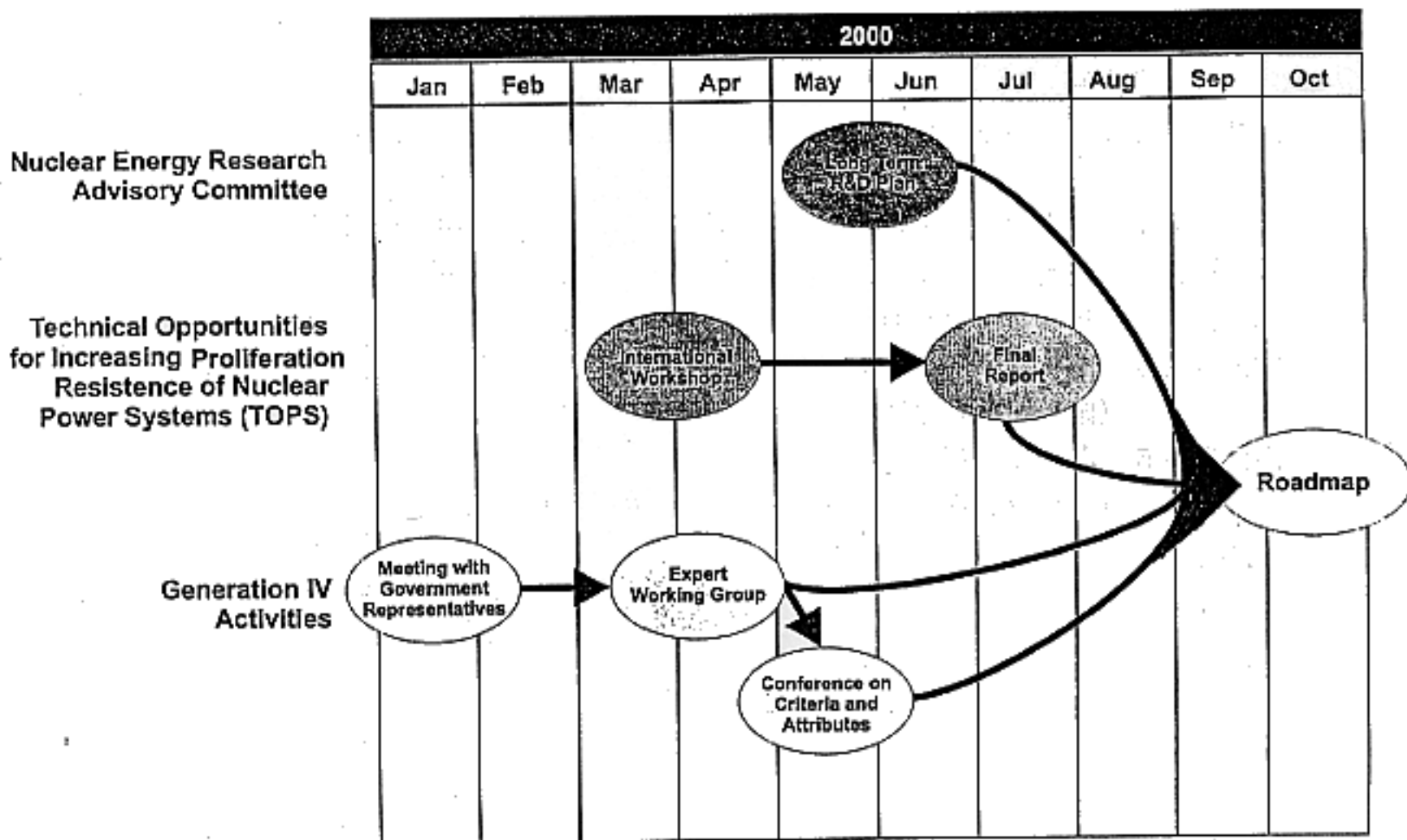


図2 米国DOEの原子力研究開発予算
(NEI Nuclear Energy R&D Summit (00/03)資料より)

Office of Nuclear Energy, Science and Technology



Nuclear Energy R&D

Appropriations Profile (\$ in Millions)

	FY 1997	FY 1998	FY 1999	FY 2000	FY 2001 Request
Advanced Light Water Reactor Program (ALWR)	\$36.9	--	--	--	--
Nuclear Energy Research Initiative (NERI)	--	--	\$19.0	\$22.5	\$35.0
Nuclear Energy Plant Optimization (NEPO)	--	--	\$0.0	\$5.0	\$5.0
Accelerator Transmutation of Waste (ATW)	--	--	--	\$9.0	0.0*
Advanced Nuclear Medicine Initiative	--	--	--	\$2.5	\$2.5
Universities Programs	\$4.0	\$7.0	\$11.0	\$12.0	\$12.0
Special Purpose Fission Technology	--	--	--	--	\$2.0
TOTAL	\$40.9	\$7.0	\$30.0	\$51.0	\$56.5

International Workshop on Generation IV Nuclear Power Systems

Washington, D.C.
January 27-28, 2000

Joint Statement

The attendees of the International Workshop on Generation IV Nuclear Power Systems have reached a consensus view that:

Significant growth in electricity demand will occur during the next 50 years, predominantly in developing countries.

Currently, two billion people have no access to electricity, reducing the quality of life for that sector of the Earth's population.

There are growing world-wide concerns about the consequences of air pollution and greenhouse gas emissions.

Nuclear power currently provides 17 percent of the world's electricity without emitting air pollutants and greenhouse gases.

Nuclear power continues to hold important electricity supply and clean air benefits for the future.

Third-generation nuclear power technology will continue to provide a viable option for the nuclear power industry in some countries for the next two decades, although its cost-competitiveness must be improved.

Future nuclear power technology should be developed in concert with future nuclear fuel cycles.

Future nuclear power technology development should take into account enhancements in economics, safety, energy supply security, waste management and nonproliferation. Such technology must be equally accessible to both industrialized and industrializing nations and provide for technology transfer to and economic participation by customer nations.

Generation IV nuclear power systems should effectively address these issues in a fashion that will promote greater public acceptance, and particularly by providing a cost-competitive option.

Governments can foster the advance of nuclear power technology by:

- Conducting long-term research, development, and demonstration,
- Resolving waste disposition issues,
- Investing in human and technological infrastructure, and
- Assuring effective nuclear regulation for the twenty-first century.

Therefore, **GENERATION IV NUCLEAR POWER SYSTEMS** should be investigated as an option for the future.

Such an investigation should be pursued on a multilateral basis, involving both industrialized and industrializing countries and, as appropriate, inter-governmental organizations.

As a next step, a technical group composed of representatives of the governments present will be assigned the task of further discussion on technology issues associated with Generation IV and making recommendations regarding potential future multilateral cooperation.

So say the representatives from the following participating nations:

Argentina
Brazil
Canada

France
Japan
Republic of Korea

South Africa
United Kingdom
United States of America

International Senior Technical Experts' Meeting
on Generation IV Nuclear Power Systems

Washington, D.C.
April 7, 2000

Joint Statement to the May, 2000
Workshop on Generation IV Nuclear Power Systems

The International Senior Technical Experts Group on Generation IV Nuclear Power Systems has been chartered with:

“further discussing the technology issues associated with Generation IV, and making recommendations regarding the direction of potential future multilateral cooperation.”¹

The Group met for the first time and reached a consensus view that:

- All of the countries share interests in common areas of advanced nuclear energy research and development that can support the development of next-generation nuclear power technologies; and,
- Within these research areas, many opportunities for bilateral and multilateral efforts have been identified and should be explored further; and,
- Before specific joint research efforts can be initiated, it is important to establish criteria that the next-generation nuclear power technologies should strive to meet. Furthermore, the characteristics that enable these technologies to meet the criteria should be identified.

The International Senior Technical Experts Group intends to proceed toward initiating joint collaborative research and development projects. Therefore, the Group takes special interest in the deliberations to be held at the Generation IV Workshop in May 2000. The Group looks forward to the results of the Workshop being factored into the development of bilateral and multilateral research efforts to develop next generation nuclear power technologies.

So say the representatives from the following participating nations:

Argentina
Canada

France
Japan

Republic of Korea
United States of America

¹ Joint Statement of the International Workshop on Generation IV Nuclear Power Systems, February 10, 2000, Washington, D.C., <http://www.ne.doe.gov/jointstatement.html>

研究題目	実施者	特徴
静的安全特性をもつ経済的大容量APWRの研究	WH	AP600を大容量化して建設費を低減
小型、工場生産、輸送可能第4世代システムの設計、レイアウト概念	テネシー大 MIT, ORNL, WH, TVA IPPE(ロシア) ニューポートニュース造船	
統合型原子力・水素エネルギー供給/媒体システム	ANL テキサスA&M GE, ENEA, JNC	鉛冷却高速炉を高温度化してガスタービン 熱化学的水素製造法の結合 廃熱利用の海水脱塩
SGならびに熱交換器における流体起因の振動についての設計基準の開発	UC-ロスアンジェルス	
ペブル炉用オンライン燃焼度測定システムの設計と製作	シンシナティ大 MIT	
高温ガス炉用BOP解析とタービン機器設計	MIT ノーザン/エンジニアリング	ヘリウムガスタービンの検討 熱交換器の検討 構造材の検討
長寿命炉心用の炉内出力、燃料燃焼環境測定	オハイオ州立大 アクロン大, WH	
次世代原子力発電所における主要機器故障の事前警告	ORNL デューク・エンジ&サービス	プラント運転データ処理
拡散抵抗強化、廃棄物減量のためのトリウム利用の非均質系の最適化	BNL MIT, ベングリオン大, GEA, クルチャトフ	ラドコウスキーの仕事の延長 軽水炉燃料へのトリウム混入 高燃焼度化と高放射能化 均質系はINEEL
核異性体の研究:エネルギー放出実証、生産と応用	LLNL LANL	核物理の基礎研究

添付資料4 第4世代原子炉候補
国際上級技術専門家会議(2000年4月)などより

国	システム	特徴	現況
アルゼンチン CNEA+INVAP	CAREM(一体型PWR)	100MWt、自然循環、自己加圧、固有安全システム	設計の統合 実験の検証
カナダ AEOL	CANDU X シリーズ Mark 1 NC DC CANDUol X1 CANDUol X2	間接サイクル、出口温度:430°C(310°Cから) 自然循環、出口温度:~400°C 超臨界圧、直接サイクル、出口温度:430°C 超臨界圧、直接サイクル、出口温度:450°C、超高压タービン 超臨界圧、直接サイクル、出口温度:625°C、超高压タービン	
フランス CEA	IRISプロジェクトへの参加 ABWRの研究 HTR 先進的概念(ガス炉) 先進的概念(その他)	小型PWRの可能性追求 Puリサイクル上の特性、廃棄物量の観点からの評価 市場にたいする適正、フラマトム(GT-MHR)のサポート 高速炉 液体金属(Na、鉛、鉛ビスマス;ADS用)、超臨界圧水、流動燃料(溶融塩、粒子ベッド)	NERI 調査研究 概念検討 概念検討 調査研究
韓国 KAERI	KNRG(韓国次世代炉) SMART KALIMER HYPER DUPLIC	140万KWの新型PWR 9万KweのSG一体型PWR MA燃焼も視野に入れた15万Kweプール型高速炉 電力生産とTRU消滅のADS PWR使用済み燃料を脱被覆、酸化・還元し焼き固めてCANDUへ	基本設計中 基本設計中 概念設計中 検討中 実験検証中
日本	FBR ABWR-2 高温ガス炉 低減速水炉 小型軽水炉 超臨界圧炉 4S-FR 溶融塩炉	JNC(もんじゅ、実用化研究) 東電、GE、東芝、日立 原研、富士電機、三菱重工 原研、日立、東芝、三菱重工 原研、日立、東芝、三菱重工 東大(岡)、日立、東芝 電中研、東芝 東海大ほか	実用化戦略研究 概念検討 HTTRの活用 HTTR起動試験 概念検討 概念評価 概念評価 概念評価
米国	IRIS(小型統合型PWR) ENHS(鉛冷却自然循環) LMR-AMTEC モジュラーペブルベッド炉	WH中心、長寿命炉心(10年) LLNL、 WH、炉心はほとんど高速炉の直接熱電変換 INEEL, MIT	原電、東工大(二の方)の協力 電中研、東芝の協力 PBMRの間接サイクル版(?)

テーマ	研究機関	技術的特長	核拡散抵抗性	研究開発課題
超高燃焼度 $\text{ThO}_2\text{-UO}_2$ 軽水炉燃料	ABB-CE ANL フラマトム JNEEL MIT ハーヴェ大学 シーメンス フロリダ大学 ウェスティングハウス	高熱伝導度 トリウムの高転換率の利用 高燃焼度化可能 ThO_2 はもっとも安定な酸化物	Pu生産量少 Pu-238,240,242が多い 使用済み燃料の線量が高い 再処理困難	被覆管材料 照射試験 安全解析
IRIS (International Reactor Innovative & Secure)	ウェスティングハウス ミラノ工科大学 MIT カリフォルニア大学 日本原子力発電, MIT CEAキャダラッシュ BNFL 東京工業大学 ベクトル	稠密六角格子 水の体積比が小さい 中性子スペクトラムが硬い 高転換比 燃焼に伴う反応度変化が小さい SQ内蔵、自然循環PWR	長寿命炉心(10年) 燃料無交換	長寿命炉心 高燃焼度 低保守負荷設計 遠隔モニタリング、診断
LMR-AMTEC (Liquid Metal Reactor-Alkali Metal Thermal Electric Conversion)	ウェスティングハウス	直接熱電変換 ナトリウム冷却 窒化物燃料 炉心はほとんど高速炉	長寿命炉心(10-15年) 燃料無交換	直接熱電変換 高温、高燃焼度燃料 遠隔モニタリング、診断
Encapsulated Nuclear Heat Source Reactor (ENHS)	カリフォルニア大学 ANL LLNL ウェスティングハウス 電中研 東芝 KFK KAIST	鉛あるいは鉛ビスマス冷却 自然循環 炉容器壁をDHXとして使う 炉容器自身が使用済み燃料キャスク	長寿命炉心(15年) 燃料無交換 原子炉組み立て工場で燃料装荷	詳細概念設計 経済性分析 輸送、設置FS モックアップ試験
S-PRISM	GE	ナトリウム冷却金属燃料高速炉 燃料サイクル施設のコロケーション 「IFR」コンセプトの中核	プルトニウム生産と利用のバランス 拡散抵抗性の高い再処理技術	IFR技術
BREST	NIKIAT	鉛冷却高速炉 窒化物燃料 オンライン燃料交換		窒化物燃料 ブランケットなし炉心
GT-MHR ガスタービン・モジュラー・ヘリウム・炉	GA フラマトム 富士電機 MINATOM	ヘリウムガスタービン高温ガス炉 プリズマティック炉心 中心に反射体黒鉛部のある環状炉心 格納容器	被覆粒子(TRISO) オフライン燃料交換 高燃焼度(120,000MW/D/T) 再処理困難	連続燃料製造プロセス “Cure-in-place”熱処理 トリウム燃料の利用 長期サイクル
モジュラーペブルベッド炉	MIT JNEEL	ペブルベッド高温ガス炉 オンライン燃料交換	高燃焼度(～100,000MW/D/T) 低出力密度 燃料が分散 プルトニウム同位体組成	濃縮度の最適化 高燃焼度燃料 トリウム燃料の利用