

3. 研究開発領域

3.1 エネルギー資源開発技術

（1）研究開発領域の簡潔な説明

メタンハイドレートをはじめとする在来型・非在来型資源を対象として、掘削、輸送、精製、貯蔵、および利用などトータルシステムに関する研究開発領域である。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

近年、石油・天然ガスの採掘をめぐる環境の変化には、油価の変動、在来型油田の減退、新規需要市場のシフト（中国、インドなど）、低炭素化、資源ナショナリズムの台頭があげられる。国営石油会社は在来型油田の埋蔵量の80%近くを支配している。埋蔵量へのアクセスが縮小する環境下に置かれた国際石油資本は、石油開発の対象を地下から採り出しやすい「在来型」から採り出し難い「非在来型」の油や天然ガスにシフトしている。このような近年の石油開発の環境の変化が、シェールガスを含む「非在来型の石油や天然ガス」の世界的な開発を後押ししている。

一方で、原油の長期価格は、大部分はその採算コストに基づかなければならない。原油は、追加採掘コストの価値を持つべきである（すなわち、需要を満たす最も高い値段）。しかし、原油採掘プロジェクトの開始から、その原油を市場に流通させるまでには7～8年近くの長い時間がかかる。油価は市場で刻々と変わる。日々のベースで、「油価が今日はXドル/バレルだから、Xドル/バレルより安い全ての油を生産できる」と、決められないことが資源開発の判断を難しくしている。

[動向（歴史）]

1973年と1979年に発生した二度の石油危機は、我が国における石油自主開発の必要性をさらに増大させた。その対策の一つとして、石油公団が中心となって海外上流権益を取得し、石油開発プロジェクトを運営していく、いわゆるナショナル・プロジェクト方式が採られ、いくつかのプロジェクト会社が設立された。原油価格低落や為替変動の影響により、国策としての運営は難しい状況に追い込まれた。

石炭・石油・天然ガスといった化石燃料の資源量限界論は200年前から存在するが、採掘技術の進展で可採年数は維持・増加し続けている。2010年以降、北米では中・軽質原油であるシェールオイルの経済合理的な生産が顕著となり（2011年120万バレル/日、2012年200万バレル/日、2013年350万バレル/日）、採算コスト（40～50ドル/バレル）で競合する重質油開発にとって逆風である。

石油と天然ガスの起源と生成イメージは下記の通りである。

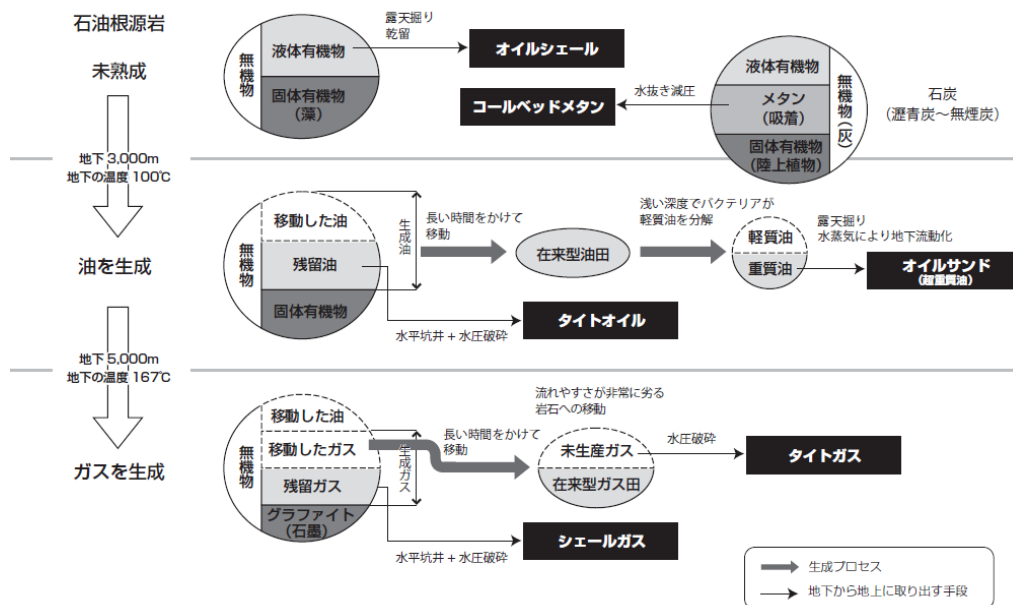


図 3-1

出所：奥井明彦（2012）ほかに基づき作成

採掘技術自体はメタンハイドレートを除けば、確立済みといえる。

1990年代に入り、(財)エネルギー総合工学研究所などで非在来型天然ガスの一つとして、メタンハイドレートの研究が開始されている。近年の調査により、メタンハイドレートは、日本近海において、国内消費量換算で100年超の賦存量があるとの試算が示されている。資源開発としては、2001年度より、官民学共同のメタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム(MH21)にて、主として賦存量調査と掘削技術開発に関する研究開発が進められてきているが、調査範囲は極めて限定されており、掘削方法も十分に確立されていない。

また、メタンハイドレートは、砂礫中に分散する孔隙充填型と海底表層近傍に高純度なものが堆積する表層型に分類できることが分かってきた。日本近海では、太平洋側に孔隙充填型が、日本海側に表層型が賦存することが確認されている。米国石油メジャーなどの海外資本は、純度が高く採掘が容易だと考えられる表層型に注目し、日本海の資源量調査のため、国内大学への資金提供を開始している。

賦存量調査には、従来高コストな電磁震源探査法や曳航式電磁探査法が主として用いられてきたが、表層型に限っては、より簡便かつ低コストの計量魚群探知機による音響探査法が有効で、すでに実用化がなされている。

掘削技術としては、減圧法が提案されている。減圧法は、孔隙充填型メタンハイドレートに有効だとされており、南海トラフ周辺海域において、実証試験が開始されている。他海域において賦存が確認されている表層型メタンハイドレートに対する有効な掘削技術については、海洋土木工学分野における全く新たな研究開発を進める必要がある。

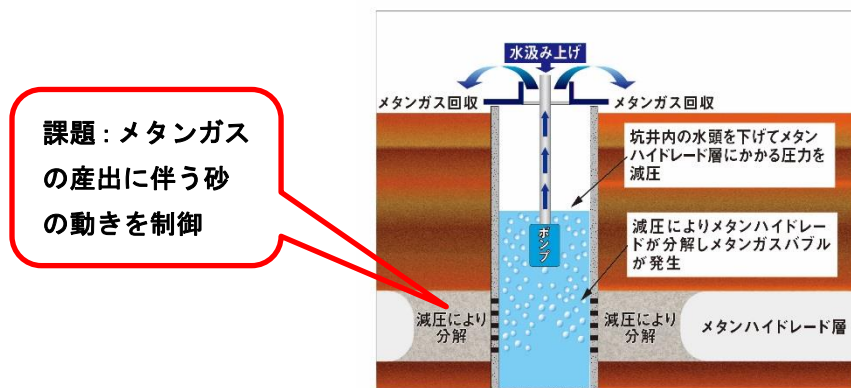


図 3-2 メタンハイドレートの採掘技術（減圧法）

掘削されたメタンハイドレートの輸送、精製、貯蔵、および利用のそれぞれの技術については、既存技術の応用が可能だと考えられる。洋上での気液分離とパイプライン輸送、硫黄分などの微量物質除去技術、メタンガスの一時貯蔵技術について、新たなシステム開発が必要だと考えられる。

（3）注目動向

[注目すべきプロジェクト]

メタンハイドレートの資源開発としては、2001年度より、官民学共同のメタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム（MH21）にて、主として賦存量調査と掘削技術開発に関する研究開発が進められており、2013年1月から、南海トラフ海域において産出実証試験が行われている。

日本海側の表層型メタンハイドレートが相次いで発見されていることを受け、2012年9月、日本海側の10府県が海洋エネルギー資源開発促進日本海連合（秋田県、山形県、新潟県、富山県、石川県、福井県、京都府、兵庫県、鳥取県、島根県）を設立し、日本海側海域の賦存量に関する合同調査プロジェクトを立ち上げた。

米国エネルギー省は、MH21とのアラスカ陸上産出実証試験共同プロジェクトの成功を受け、2012年8月、メタンハイドレートに関する研究を加速するため、新たに14のプロジェクトを立ち上げた。主なものに、産出時の環境影響評価、残渣の性状分析、および海域資源調査がある。

韓国は、2014年から韓国名ウルルン海盆（日本名対馬海盆）の竹島西方海域における生産を開始するとのプレスリリースをしており、実現すれば世界初の実用化事例となる。

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

メタンハイドレートの商業的開発には、メタンガスの産出に伴うメタンハイドレート賦存層内の砂の動きを、岩石力学の見地から如何に制御するかが課題となる。

[今後取組むべき研究テーマ]

- 日本周辺海域におけるメタンハイドレートの賦存状況と特性の明確化。
- 有望メタンハイドレート賦存海域のメタンガス賦存量の推定。
- 有望賦存海域からのメタンハイドレート資源フィールドの選択、並びにその経済性の検討。
- 環境保全に配慮した開発システムの確立。

日本周辺海域における賦存量の正確な把握とともに、海底下に賦存するメタンハイドレートの経済的な生産技術の確立が急務となっている。また、生産が開始された際の国内輸送・貯蔵システムの整備や最終利用形態まで含めたライフサイクルアセスメント（LCA：Life Cycle Assessment）、さらにはメタンハイドレートサイトへのCO₂貯留技術（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）など、メタンハイドレート利用技術について、トータルシステムとしての研究開発の推進が求められる。

（５）政策的課題

現状、石油やガスの採掘産業にインパクトを与えるとされるパラメーターの変動を見守りつつ、石油天然ガス資源を地下から取り出す技術の取捨選択が、採掘産業の発展にとって大事になる。現状の油価 50 ドル/バレル近辺が今後数年続くとすれば、採算コストが比較的高い重質油や大水深での石油開発は苦戦を強いられよう。

エネルギー資源はビジネス商品から、技術・商業・政治リスクがある戦略物資に変わったことを認識すれば、ビジネス参入に際しては、海洋石油開発や重質油・シェール資源採掘の経験に長けた欧米企業とパートナーシップを結ぶことの重要性は言うまでもない。

日本の海運会社、造船会社やエンジニアリング会社がもつ技術を、メタンハイドレート採掘事業に取り込み検証を重ねることで国際的に通用する実のあるものにできる。

（６）キーワード

改質/乾留、水平坑井、水圧破碎、水蒸気による地下流動化、減圧法、メタンハイドレート

（7）国際比較

各国の資源量の多寡、石油採掘の歴史に大きく依存する。

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	石油採掘の歴史はあるが、資源小国
	応用研究・開発	◎	→	石油採掘の歴史はあるが、資源小国（除くメタンハイドレート）
米国	基礎研究	◎	→	資源大国、石油採掘の歴史あり
	応用研究・開発	◎	→	資源大国、石油採掘の歴史あり
欧州	基礎研究	◎	→	石油採掘の歴史あり
	応用研究・開発	◎	→	石油採掘の歴史あり
中国	基礎研究	○	→	資源大国
	応用研究・開発	○	→	資源大国
韓国	基礎研究	△	→	資源小国
	応用研究・開発	△	→	資源小国

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

（8）参考文献

- JST-CRDS「研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野（2015年）」
- 伊原賢「石油資源の行方」コロナ社（共著）2009年4月
- 伊原賢「シェールガス革命とは何か」東洋経済新報社 2012年8月
- 伊原賢「天然ガスシフトの時代」日刊工業新聞社（共著）2012年12月

3.2 火力発電

（1）研究開発領域の簡潔な説明

火力発電は、石油・石炭・天然ガス(LNG)・廃棄物などの燃料の反応熱エネルギーを電力へ変換する発電方法の一つである¹⁾。今後の燃料として中心的な役割を果たすと考えられる石炭と天然ガスを対象として、ここでは、次の2つの分野の研究開発を対象とする。

- ① 石炭火力発電（ボイラー－蒸気タービンによる発電、石炭ガス利用の〔ガスタービン－蒸気タービン〕ダブル複合発電、石炭ガス利用の〔燃料電池－ガスタービン－蒸気タービン〕トリプル複合発電など）
- ② 天然ガス火力発電（シングルサイクルガスタービン発電、ダブル複合発電、トリプル複合発電など）

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

我が国は、COP21（第21回気候変動枠組条約締約国会議）のパリ協定合意を受け、温室効果ガスの2030年度削減目標（2013年度比26.0%減）達成に向け着実に取り組むと意思表示した²⁾。再生可能エネルギー導入促進や安全性の確認された原子力発電の活用とあわせ、エネルギーの供給安定性、経済効率性からは、火力発電の高効率化を着実に推進し、バランスの取れた電源構成、即ちエネルギーベストミックスの実現が重要となる。2014年時点では、東日本大震災による原子力発電停止に伴い、国内発電の88%を火力発電が担っていたが、CO₂排出量と燃料費を抑制する観点から、2016年6月に策定されたエネルギーミックスでは、2030年の火力発電の比率は56%とし、その構成は、天然ガス(LNG)火力27%、石炭火力26%と、天然ガスと石炭の比率をほぼ半々としている。今後、各々の高効率化を進め、環境負荷を低減しつつ活用していくことが求められる。

[動向（歴史）]

石炭火力発電（ボイラー－蒸気タービンによる発電）の重要な機器である蒸気タービンの技術は100年以上にわたって営々と技術の改良がなされ、効率向上が実現されてきた。その最大の貢献はタービン入口蒸気の高圧化・高温化であった。第二次世界大戦前は日本の火力発電の効率は20%を越えることはできなかった。戦後、米国から最新技術が導入され、一気に高効率化が進んだ。再生サイクル、再熱サイクルの採用と合わせて、高圧化・高温化が更に進み、1960年代の亜臨界圧〔Sub-C：Sub-Critical、蒸気圧22.1MPa未満、蒸気温度約538℃、発電効率約36%（送電端、高位発熱量基準）、石炭燃焼時のCO₂排出原単位約900g/kWh、以下同〕、1980年代の超臨界圧〔SC：Super Critical、22.1MPa以上、566℃、約38%、約850g/kWh〕、そして1998年には温度600℃のいわゆる、超々臨界圧〔USC：Ultra Super Critical、約25MPa、600～630℃、約40%、約800g/kWh〕が営業運転を開始した。USC技術は、実質的に我が国が材料開発及び実証試験を経て実用化したもので、鉄鋼・重工業メーカー・電力会社が緊密に協力し、かつ、的確な国の支援があり開発に成功したものである。しかし、この技術も現在の鉄系材料を使う限り630℃程度が限界となっている。USC発電の効率をさらに向上させるには、700℃級の蒸気温度が必要であり、この実現のた

めに先進超々臨界圧 [A-USC : Advanced-Ultra Super Critical、約 35MPa、700°C、46～48%、約 700g/kWh] プロジェクトが実施されている。A-USC には新たな高温材料開発が必要であり、現在の鉄系材料に代わり、ニッケル合金材料が候補となっている。中国は、日本からの技術導入により USC プラントの国産化を計り、既にその製造能力は日本の 10 倍に達し、国内だけでなく、国際マーケットにも進出中で、二段再熱式 A-USC の研究開発も進め³⁾、日本の強力なライバルとなりつつある。最近のバングラデシュの USC 商談でも、中国とインドが日本よりも遙かに安い価格で受注している。

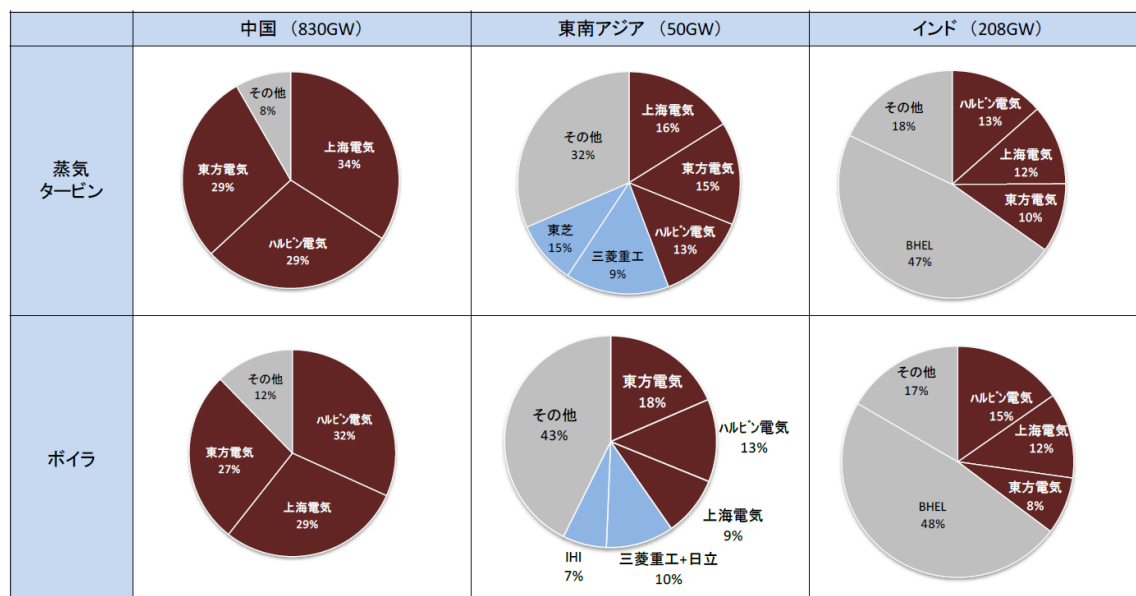
ダブル複合発電 (GTCC : Gas Turbine Combined Cycle) は、使用燃料が天然ガスと石炭で現在の技術段階が異なる。燃料が天然ガスの場合、1980 年代より実用化され、主機であるガスタービンの技術がほぼ円熟期を迎えつつあり、ガスタービン入口ガス温度は既に 1600°C [発電効率 約 52%、天然ガス燃焼時 CO₂ 排出原単位 約 340g/kWh、以下同] が商用機として実現されている。現在、1700°C [約 57%、約 310g/kWh] のガスタービンの実現が最大の開発目標であり、2020 年までの実用化が期待されている。米国は、エネルギー省 (DOE) 国家プロジェクトでガスタービンメーカーや大学に約 1000 億円 (2003～2015 年) を投資して高効率化を推進してきた。欧州は、CAME-GT と呼ばれるイニシアチブの中で高効率ガスタービンの開発を推進し、現在は第 7 次欧州研究開発フレームワーク計画 (FP7) の中で個別に要素技術改良の研究開発を実施している。

一方、燃料が石炭の場合、固体である石炭を粉碎後、ガス化し、ガス精製にて浄化後、ガスタービンで燃焼する石炭ガス化複合発電 (IGCC : Integrated Gasified Combined Cycle) となる。石炭をガス化する際に空気を使う場合が空気吹き IGCC、酸素を使う場合が酸素吹き IGCC となる。酸素吹きの方が、窒素が存在しない分酸素投入量 (酸素比) を減らせるためにガス化効率は高いが、一方で巨大な酸素製造設備が必要となることから、発電効率は空気吹きよりも低い傾向にある。空気吹き IGCC は日本のオリジナル発電方式であり、2007 年から 2013 年にかけて 25 万 kW 実証プラント試験を完了し、同年より商用運転が開始されている。本方式は、福島復興 IGCC プロジェクトとして展開され、500MW 機 2 基の計画が 2020 年代初頭(予定)の運転開始を目標に進められている^{4), 5)}。他方、酸素吹き IGCC を開発してきた欧米では、商用運転中 IGCC プラントが米国 3 件、スペイン 1 件、建設中あるいは計画中の IGCC+CCS (Carbon Capture Storage) プラントが米国 4 件、英国 2 件となっているが、計画段階でプロジェクトが進捗していないものや安定運転ができていないものも見られる⁶⁾。中国は、USC 技術が日本からの技術導入であったため、IGCC は国産技術で開発すべきとの国の方針により、GreenGen IGCC プロジェクト (酸素吹き、265MW) を推進し、運転を 2013 年 6 月に開始した⁷⁾。今後、試験的応用を拡大し、国産化水準と経済性を高めるとされている。また韓国では 2016 年に韓国西部電力の Taean 305MW の IGCC 商用機が運転を開始する予定である²¹⁾。オランダとスペインには 1990 年代より商用運転を続けてきた IGCC プラントが存在したが、経済的理由からオランダは 2013 年に商用運転が終了し、スペインは 2016 年初頭から運転停止中 (今後解体予定) である。

トリプル複合発電は、上記 GTCC や IGCC に最高温のトッピング機器を構成する高温型の固体酸化物形燃料電池 (SOFC : Solid Oxide Fuel Cell) を組み込んだ方式で、発電効率が 5～15% (絶対値) 向上することが期待されている。トリプル複合発電においては、大型 SOFC の実用化が鍵となる。SOFC そのものについては更なる性能向上、耐久性向上のために種々

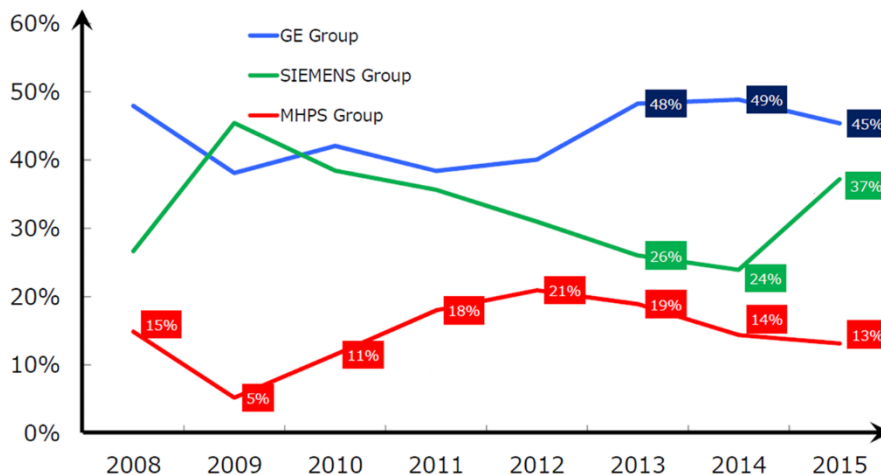
の基礎的な研究開発が全世界で進められているが、火力発電において SOFC がその真価を発揮するのは、1000℃に近い高温での作動を最大限に生かし、複合発電として実現する場合である。このため SOFC とマイクロガスタービンを組み合わせた 250kW 級の実証試験も進められている⁸⁾。このような技術開発をさらに発展させ、より大型のトリプル複合発電の研究開発が進むことが期待されている。

火力発電機器市場動向をみると、特にアジア地域における蒸気タービン、ボイラー市場では中国発電システムメーカーのシェアが、2000 年代後半以降大きくなっている（図 3-3）。上海電気、東方電気、ハルビン電気の中国重電メーカー 3 社は、中国国内の高シェアはもとより、東南アジアやインドにおいても、2001 年以降の累計で 4 割前後のシェアを占めるまでになっている。一方、ガスタービン世界市場シェアでは、図 3-4 に示されるように、GE、Siemens、MHPS(三菱日立パワーシステムズ株式会社)の 3 つのグループが市場を独占しているが、MHPS のシェアは漸減の傾向である。



（出所：McCoy Power Report よりみずほ銀行産業調査部作成）

図 3-3 アジア地域における蒸気タービン、ボイラー市場シェア（2001-2013 累計）³²⁾



(出典：McCoy Report)

図 3-4 ガスタービン世界市場シェアの推移

(3) 注目動向

[新たな技術動向] 9) ,22) ,25) ,26) ,27) ,28) ,29)

- ・ガスタービン燃料電池複合発電 (GTFC : Gas Turbine Fuel cell Combined cycle)

2015年3月より250kW級SOFC-MGTハイブリッド発電システムの実証試験が継続中であり、2017年度中の商用化を目指している¹²⁾。また、この成果を受けて、約5倍のスケールアップ機の1,300kW級システムを2019年度に商用化すべく計画を進めている。蒸気系を有するトリプル複合発電化については、SOFCスタックの大型化技術開発を進めるとともに、10万kW級の実証事業を経て、2025年度頃までに技術を確立し、発電効率63%、CO₂排出原単位約280g/kWh(40万kW級相当)、量産後従来機並の発電単価を目指している。また、下記IGFCの技術開発と並行して実施されている。

- ・石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC : Integrated Gasified Fuel Cell Combined Cycle)

酸素吹きIGCC技術開発と同一プロジェクトにおいて一体的に開発を進めており、GTFCの技術開発とも相補完しながら開発を行ない、2018年度から2021年度にかけて、生成ガス一部抽気による小型IGFC実証試験を予定している。GTFCの技術開発成果を活用して、2025年度頃までに大型IGFCの技術を確立、発電効率55%、CO₂排出原単位約590g/kWh、量産後従来機並の発電単価を実現する。

- ・高水分空気利用ガスタービン(A-HAT : Advanced -Humid Air Turbine)¹⁰⁾

中小型基向けのシングルサイクルガスタービン発電技術として、2017年度に要素実証事業を終了し、発電効率51%、CO₂排出原単位約350g/kWh、従来機並のインシヤルコストを実現し、将来的にGTFCの成果の活用も検討することとしている。また、負荷応答性に優れた特性を有するため、後述する再生可能エネルギーとの協調制御型火力発電システムとしての検討も進められている。

- ・二酸化炭素回収・貯留システムに適した発電技術

酸素燃焼発電技術（Oxy fuel Combustion）¹¹⁾、高効率でCO₂をほぼ全量回収可能なクローズドIGCC技術¹²⁾、酸素キャリアによる石炭の酸化反応によりCO₂のみを排出させるCO₂分離型化学燃焼（ケミカルルーピング燃焼）技術などの開発が行われている¹³⁾。国内では東芝が、米国ではエネルギー省が中心となり、超臨界CO₂サイクル発電システムの開発を進めている。

- ・再生可能エネルギーとの協調制御型火力発電技術

太陽光・風力発電の大量導入時の負荷変動に対して、系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発が進められている。2030年時点で、100MW超の大容量機で10分以内、それ以下の中・小容量機では5分以内の起動時間を目指し、最適システム設計、各機器の過渡応答・繰り返し負荷に関する対応技術開発が進められている。

- ・水素・エネルギーキャリアによる火力発電技術

ガスタービン発電におけるアンモニア専焼技術や天然ガス／水素混焼技術、水素専焼技術、微粉炭火力発電におけるアンモニア混焼技術などに向けた技術開発と実証研究が進められている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]^{23),24)}

700℃級の蒸気条件の採用をめざすA-USCプロジェクトは、世界各国で進められてきた。このうちヨーロッパでは再生可能エネルギーへの手厚い保護による風力発電などの設備急増により、電力会社の経営が急激に悪化、開発余力が無くなり、ほとんどのプロジェクトが中止または延期となっている。また米国でもオバマ政権の石炭火力建設禁止・天然ガスプラント推進の方針により研究開発は事実上ストップしている¹⁴⁾。一方、中国は「国家700℃A-USC石炭火力発電技術イノベーション・アライアンス」を設立し、二段再熱式A-USCの研究開発を進めている³⁾。日本では、2017年度以降、主に老朽火力を対象に、再熱器・再熱蒸気管より段階的な実用化（600℃級USCと同様の導入過程）が図られる予定である。

天然ガス利用のダブル複合発電では、経済産業省、三菱重工業の1700℃級ガスタービン研究開発が着目される。2020年度頃までに1700℃級の超高温GTCC技術（発電効率57%（送電端効率、以下同）、CO₂排出原単位約310g/kWh、量産後従来機並のインシヤルコスト）を実現すべく開発が進められている。また、2030年度頃に向けて段階的に1800℃級への高温化を図る計画である。米国では、シェールガス重視の方針から、天然ガス複合発電が次々に建設されるものと考えられる。また、世界市場でもGE社によるAlstom社買収により、その世界市場占有率は50%を越え、着実に米国製造業の復権に貢献するものと考えられる¹⁵⁾。さらに、米国エネルギー省は、2016年から3年半3億ドルのGTCC開発プロジェクト（Phase2）を立ち上げた²⁶⁾。主眼は蒸気の代わりに超臨界CO₂を作動流体として用いるタービンシステムの開発であり、商用規模のサイクル実証試験や先進的燃焼技術開発が採択されている。国内では、東芝が米国ネットパワー社、シカゴブリッジアンドアイアン社およびエクセロン社と共同開発を進めている²⁷⁾。欧州では、FP7において、IGCC+CCSプラントにおける水素リッチガスタービン開発（17.8Mユーロ）が2009年より行われている³⁰⁾。また、2014年よりHorizon2020プロジェクト（72Bユーロ）がスタートし、CCSやCCUの関連技術の開発提案がなされているところである³⁰⁾。

一方、IGCCについては、日本において商用化の準備が着実に進んでいる。空気吹き IGCC では、勿来の 250MW 実証機が実証機としての使命を終え、2014 年 4 月より商用機となり、常磐共同火力株式会社が現在順調に運転をすすめている。また、福島復興 IGCC プロジェクトとして、2020 年運転開始を目標に福島県に 500MW IGCC 商用機を 2 基建設するプロジェクト（東京電力、三菱重工業、常磐共同火力株式会社など）が進行中である。さらに、酸素吹き IGCC として、大崎クールジェンプロジェクト 170MW（中国電力、電源開発）が 2013 年 3 月着工され、2017 年の運転開始を目標に建設中である¹⁶⁾。米国では 2013 年 6 月に 618MW の商用第 1 号機 Edwardsport プラントがインディアナ州で運転を開始したが、低い効率と大幅な予算超過による経済性の悪化が問題となっている。また、2014 年に運転開始予定であったミシシッピ州の Kemper County プラント 582MW も 1 年以上の工程遅延と大幅な予算超過が報告されたが¹⁷⁾、2016 年 7 月には石炭ガス化に成功したと報じられた²⁰⁾。このような状況下で、実証機から商用機へと確実に進んでいる日本の IGCC 技術が一層注目されている。

トリプル複合発電技術の鍵となる SOFC に関しては、米国で Bloom Energy 社が、200kW 機を分散電源用として既に数十機販売しており、日本でもソフトバンクの強力な援助を受けて販売拡大を図っている¹⁸⁾。また、GE 社は 2016 年に SOFC を販売すると公表している¹⁹⁾。日本では 250kW の NEDO プロジェクトが進行しており、九州大学においてマイクロガスタービンとのハイブリッドシステムの実証が進んでいる²⁵⁾。

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

• A-USC

A-USC の実用化には、伝熱管、主蒸気管、および再熱蒸気管などに適用可能な耐熱性能 700°C 以上の Fe-Ni 基合金や Ni 基合金の開発、およびその他高温部品（650°C 域）における低コスト先進フェライト系鋼の開発、またこれらの製造法、信頼性（高稼働率）と経済性を両立させるためのシステム設計が課題である。これには、10 万時間超の高温クリープ試験に加え、耐水蒸気酸化性や耐石炭灰高温腐食（硫化腐食）性に関する試験が不可欠である。また、熱応力・破壊力学シミュレーションや実機環境を模擬する熱流動シミュレーション技術開発との統合が重要である。製造技術の観点からは、高い溶接性や曲げ加工特性をもつことが必要で、さらに実用化に際しては、既存 USC プラントの再熱蒸気管などから段階的にリプレイス導入していく方式が効率的であり、システム設計面からの技術支援が課題となる。

さらに、再生エネルギー導入拡大による系統調整に対応可能なレベルでの、負荷変化速度の向上・最低負荷の引き下げ・起動時間の短縮等も課題である。また、定期点検間隔延長に対応するために ICT、AI 技術を活用した遠隔監視技術、運転診断技術の開発も必要となっている。

• GTCC

ダブル複合発電については、タービン入口温度（TIT）の高温化が高効率化の大きな課題である。TIT は既に 1600°C 級が実用化されており、更なる効率向上には 1700°C 級さらには 1800°C 級を目指す必要がある。これには、耐熱合金を一方向凝固材から単結晶材に転換する

ための製造技術、高温部品の先進的冷却技術と耐壊食・腐食性の高い耐熱セラミックコーティング（TBC）技術、超希薄予混合・高排ガス再循環（EGR）条件における安定（燃焼振動抑制）・低 NO_x 燃焼技術、高効率圧縮機・タービン技術等の研究開発が不可欠である。

さらに、今後再生可能エネルギー大量導入がなされることにより、GTCC の運用環境が一変する可能性が高い。国内にこれ以上の揚水発電サイトが見込めない現状では、100MW を超える大容量機についても、10 分程度の高速起動が可能となれば、太陽光・風力の一斉投入や離脱時の急速変化に対応可能な有力な予備力となり得る。これには、こうした過渡現象に対応可能な空力制御技術、燃焼制御（燃焼振動抑制）・低 NO_x 燃焼技術、材料の耐熱衝撃・耐繰り返し応力技術や各部のクリアランス制御等、従来の高効率化技術開発とは異なる技術研究が必須である。また、予備力として運用する場合、上げ代・下げ代確保の観点から、50% 負荷待機運転が長くなる。この負荷帯の高効率化も課題として挙げられる。

また、1700°C 機実用化に対しては、3D プリンターを適用した革新的製造技術や IT を駆使した計測・制御・検査技術の開発や、高効率なガスタービンの開発と蒸気サイクルとの全体最適マッチングも課題である。

なお、A-USC 技術開発の過程で開発された耐熱材料は、GTCC におけるボトムサイクルにも適用可能であることを付記する。

• IGCC

石炭ガス化ガスを利用する IGCC は、従来のボイラー、蒸気タービンによる発電に比べて 20% 程度の効率向上が見込めるが、現状コストが割高であり普及が進んでいない。IGCC のさらなる効率向上には、現状の湿式ガス精製に代わる高温乾式ガス精製技術の開発、所内動力低減のための高効率空気分離装置の開発などが課題に挙げられる。

また、ボトムサイクルからの抽気水蒸気を活用したガス化効率向上技術等、さらなる高効率化に向けたシステム最適化の検討の余地がある。

さらに、火力発電プラント入札において、IGCC 最大の弱点であるイニシャルコストの低減のための高圧容器・機器のコンパクト化や簡素化等が必要である。

IGCC は、GTCC 技術開発の過程で開発された TIT 高温化技術の適用が可能であるが、石炭ガス化ガス暴露に対するガスタービン高温部品の耐壊食・腐食性向上と、高温化に伴う先進的冷却技術や TBC 技術との両立は、GTCC よりも格段に高いハードルである。

高温乾式ガス精製採用時のフューエル NO_x 生成を抑制する低 NO_x 燃焼実現のため、IGCC のガスタービン燃焼器を現状の拡散燃焼器に代えて希薄予混合・多段燃焼器の実用化が必要であるが、石炭ガス化ガス含有水素による逆火問題を解決する必要がある。

なお、A-USC 技術開発の過程で開発された耐熱材料は、IGCC におけるボトムサイクルにも適用可能であることを付記する。特に Oxy-fuel 型 IGCC では、作動流体組成によってはガスタービン出口温度がかなり高温になる場合があり、タービン段の高負荷化とともにボトムサイクルの高効率化が有効な手法となり得る。

• GTFC、IGFC

トリプル複合発電では、大型 SOFC 技術や量産実用化技術の開発が重要である。大型 SOFC の実用化には、大型セルやスタックの安定した成型・製造技術、長時間運転の信頼性・耐久性、欠落部位補修時の保守性向上のためのスタック構造最適化技術等が課題となる。なおトリプル複合発電の実現の最大の鍵は SOFC セルの大量生産による大幅なコストダウンと、そ

れによる発電原価の低減であるので、この大量生産技術の完成も非常に重要である。GTFCが実用化されれば、これとIGCC技術を組合せることにより、IGFCの実用化も有望になってくると考えられる。IGFCでは、石炭ガスの不純物を極低濃度まで除去する技術開発が課題である。さらに、CCUS適用時の効率低下を最小にする熱プロセスに関する技術開発も進めておくべきと考える。

• シミュレーションを活用した理論的・合理的統合手法

火力発電システムは、極めて大型の要素機器が高度に統合されたものであり、新たな技術の実用化には多額の予算と長いリードタイムが必要である。世界はもとより、国内の主要電力会社間でも激しい競争領域となってきた。低コストかつ短期間の技術開発が求められており、従来の段階的スケールアップによる経験的手法に対して、シミュレーションを活用した理論的・合理的統合手法が不可欠である。すなわち、実験・実証研究に注力するとともに、その工程を極力省力化するためのシミュレーション研究（ハードウェア開発とソフトウェア開発の両面）についても、同時並行で、かつ綿密な連携をもつように取り組む必要がある。例えば、文科省のポスト京コンピュータプロジェクトで、CCS対応火力発電技術開発のための超並列計算ソフトウェアの開発を進める一方、NEDOではベンチスケールプラントを用いたCCS対応火力発電技術開発を行う。より効率的かつ効果的にプロジェクト成果を活用、発展させるためには、基礎研究から応用研究にいたる各過程のデータや成果の相互利用を促進するなど、各府省や参画機関の強力な連携が求められる。

[今後取り組むべき研究テーマ]

今後20年程度で再生可能エネルギーの大量導入（2030年時点でガス火力とほぼ同等の設備容量）により、我が国のエネルギー供給構造が変化し、従前の火力発電プラントの運用形態が大きく変わる可能性がある。先進的な火力発電技術開発としては、引き続き世界をリードする高効率化技術の開発に注力するとともに、高機能化技術の開発に取り組む必要がある。火力発電に求められるのは、供給力の急変に対処可能な調整予備力であり、メリットオーダーに耐えられる低コスト化（高効率化と燃料多様化）である。火力発電ラインナップの各々発電方式の特性（コストと運用性）を見極め、発電方式毎に最適な技術開発も進める必要がある。これには、国内地域毎の需給状況に応じた系統連系解析を同時に進め、火力発電に求められる効率性と運用性の必要十分条件を見極めながら技術開発を進めることが望ましい。当面は、GTCCが最も負荷応答性の点で利点があるため、分オーダー変動への対応に有利だが容量に限界のある揚水発電を補完する能力を期待する。一方、USCは当面は蓄電池とともにガバナフリー運転による瞬時周波数変動対応であるが、時間オーダー変動への対応力を増すための技術開発についても着実に進めていく必要がある。IGCC、IGFCについては、ベースロード電源として期待できる。

1. 高温材料開発・高温化技術

- ボイラー伝熱管や蒸気タービンローターのような大型機器に適用可能なFe-Ni基合金やNi基合金、先進フェライト系鋼等の新規耐熱材料開発
- 10万時間以上の長期高温クリープ実験や、腐食を伴う強度低下に対する信頼性確認試験、試験データを補完する為のシミュレーションを利用した材料評価技術の高度化・ガス分離・精製：高度な吸収・吸着操作を含む化学プロセス技術の検証

- 1700℃級超高温 GTCC 向けの超高耐熱単結晶合金材料開発
- GTCC 用ガスタービンにおいて、三次元複雑形状翼に対する 500 ミクロン以上（従来比 70%増）の溶射膜において従来並み耐壊食・腐食性を担保する耐熱セラミックコーティング（TBC）技術
- GTCC 用ガスタービンにおいて、冷却空気量を 10%以上低減しつつ従来並み翼温度を担保する先進的冷却技術（高精度翼表面乱流熱伝達シミュレーション技術の開発含む）
- GTCC 用ガスタービンにおいて、超希薄予混合・高排ガス再循環（EGR）条件における安定（燃焼振動抑制）・低 NOx（40ppm 以下）燃焼技術（高精度非定常燃焼／音響連成シミュレーション技術の開発含む）
- GTCC 用ガスタービンにおいて、メタン／水素混焼燃焼、水素専焼燃焼、メタン／アンモニア混焼燃焼、およびアンモニア専焼燃焼等の多様な燃料での超希薄予混合・高排ガス再循環（EGR）条件における安定（燃焼振動抑制）・低 NOx（40ppm 以下）燃焼技術（高精度非定常燃焼／音響連成シミュレーション技術の開発含む）
- IGCC 用ガスタービンにおける希薄予混合・低 NOx 燃焼技術（湿式ガス精製では 10ppm 以下、乾式ガス精製では 60ppm 以下）（高精度非定常燃焼／音響連成シミュレーション技術の開発含む）
- IGCC 用ガスタービンにおいて、GTCC 並み耐壊食・腐食性を担保する材料・耐熱コーティング技術
- IGCC 用ガスタービンにおいて、冷却空気量を 10%以上低減しつつ従来並み翼温度を担保する先進冷却技術

2. システム開発

- 石炭火力の高度監視技術：従来の計測点に加え、プラントの状態をより詳細に計測するセンサや計測システムの開発し、ICT、AI を活用
- IGCC における湿式ガス精製に代わる乾式ガス精製（脱硫黄、脱ハロゲン、脱アンモニア・シアン、および脱水銀・ヒ素等それぞれに対応する材料開発とシステム設計）の研究開発、高効率空気分離装置（膜分離技術等）の開発、コスト低減（コンパクト化、簡素化）技術開発、副産物である石炭スラグの高付加価値な有効利用技術構築
- IGCC におけるボトミングサイクル抽気水蒸気利用ガス化効率向上技術（1500℃級ガスタービン利用で送電端効率 48%(HHV)以上）
- 大型 SOFC 実用化のための大型セル・スタック成形・製造技術の確立による長時間信頼性・耐久性向上、スタック構造最適化技術による欠落部位補修時の保守性向上

3. 再生可能エネルギーとの協調制御型火力発電のための高機能化技術

- 急激な過渡現象に対応するガスタービン空力制御技術、燃焼制御（燃焼振動抑制）技術、低 NOx 燃焼技術、材料の耐熱衝撃・耐繰り返し応力技術、各部クリアランス制御技術
- USC における最低負荷 20%以下を実現する微粉炭バーナ技術、負荷変化時の主蒸気管温度偏差低減のためのシステム最適化、蒸気系抽気による瞬間的負荷変動対応技術
- GTCC や USC 等の各要素機器の過渡応答特性予測評価に用いる非定常熱流動・燃焼シミュレーション技術

- 火力発電所全体の過渡応答特性予測評価に用いるプラント動特性シミュレーション技術と、それに向けた各要素機器のモデル化技術
- 地域・広域間系統連系シミュレーション技術と、それに向けた火力発電所のモデル化技術
- 中・低負荷帯における高効率化技術（GTCCにおける吸気温度制御や水噴霧、圧縮機可変機構、GTCCやUSCにおける着火・安定燃焼を維持するバーナ機構等の開発）

（5）政策的課題

火力発電システムは、最先端の科学と既存技術を組み合わせて実現する大型システムであるが、文科省やJSTは最先端の要素技術開発に取り組み、システム化は経産省や産業界に任せるという役割分担を明確とする傾向が強かった。

「科学技術イノベーション総合戦略」（内閣府）では、基礎研究力の強化と産業化に向けて橋渡しする機能強化が唱えられており、エネルギー分野では「クリーンで経済的なエネルギーシステムの実現」に向けて、生産から流通まで一貫したシステムとして府省連携で取り組むことが掲げられている。火力発電システムについても、上記の高温材料やシステムの科学技術的課題に対し、最先端の要素技術開発からシステム化まで、中長期的な技術開発については、市場ニーズに基づき内閣府、経産省、文科省、NEDO、JSTが一体となって施策を行っていく必要がある。

また、従来の火力発電システムの技術開発では、高効率化技術開発がそのほぼ全てであった。しかしながら、今後20年程度での再生可能エネルギーの大量導入により、火力発電システムには調整予備力としての役割が強く求められる可能性が高いため、各府省の政策においても、このような高機能化技術開発も視野に入れる必要がある。さらに、火力発電システム運用最適化には、ICT、AIによるビックデータ解析システムが重要となるが、現状これらのデータは電力会社の経営データであり公開されていない。今後再生可能エネルギーの増加により、出力変動の大きな電源が系統に入ってくると、火力発電をネットワークとして有機的に活用する必要性が出てくるため、各発電所のデータを収集分析して最適な運転を行っていく必要がある。このためにプラットフォームとなるシステムの整備を国が支援していくことは日本の安定した電力供給のため望まれる。

キーテクノロジーであるSOFCについては、NEDOではビルや店舗での定置用として天然ガス・都市ガスなどクリーンガスを使用するものが開発されている。石炭火力発電に使用するためには、石炭由来ガスによる劣化・制御のための研究開発や大規模発電条件下に置ける高耐久性・大容量化が必須であり、産学官連携の基礎基盤研究からの取り組みが望まれる。

（6）キーワード

A-USC、ニッケル合金、先進フェライト系鋼、GTCC、冷却技術、セラミックコーティング、燃焼振動抑制、低NO_x燃焼、再生可能エネルギー、負荷運用性、IGCC、乾式ガス精製、空気分離装置、CCUS、GTFC、IGFC、SOFC

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 耐熱高温材料の開発が着実に進められている(ALCAプロジェクト) ● A-USCへの適用候補となるFe-Ni基合金やNi基合金、先進フェライト系鋼の研究開発が行われている。 ● GTCCのための単結晶材開発、冷却技術開発、TBC技術開発がそれぞれ進められている。 ● GTCCの負荷運用性向上に向けた調査研究が実施された²⁸⁾。 ● IGCC乾式ガス精製の材料開発が進められている¹²⁾。 ● IGCCボトムリングサイクル抽気蒸気のガス化炉注入による効率向上法について、反応解析やシステム解析等の基礎研究が進められている³¹⁾。 ● 酸素燃焼方式とIGCCを組み合わせた新たなOxy-fuel型IGCCシステムの基礎要素試験が進められている¹²⁾。 ● 大学や研究機関、メーカー研究所等において、SOFC材料やシステム設計に関する基礎研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● IGCCについては着実に実用化研究が進められており、商用化への加速が期待される。 ● Fe-Ni基合金やNi基合金を使った主蒸気管や管寄せ部モックアップの耐久性試験が行われている。 ● マイクロガスタービンとSOFCのハイブリッド発電システム実証試験が進められている²⁵⁾。 ● 空気吹きIGCC実証機プロジェクトが成功裡に完了し、2013年度より商用運転に移行している。 ● カライド酸素燃焼プロジェクトで世界初の発電所実機での酸素燃焼・CO₂回収一環実証試験が完了した。 ● 酸素燃焼方式とIGCCを組み合わせた新たなOxy-fuel型IGCCシステムのベンチスケール試験計画が進められている¹²⁾。 ● 酸素吹きEAGLEプロジェクトに引き続き燃焼前CO₂回収IGCCやIGFCを視野に入れた大崎クールジェンプロジェクト実証試験が計画されている²⁴⁾。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 米国の大学・研究機関における基礎研究は、エネルギー省のサポートにより、幅広い分野で高いレベルにある。 ● 最先端レーザーを使ったその場計測・観察技術や高度なシミュレーション技術の活用により、先進的な基礎研究を実施している。 ● エネルギー省は、2016年より、超臨界CO₂サイクル発電技術開発に対して3億ドルのプロジェクトを立ち上げ、CO₂リサイクル燃焼技術開発を積極的に推進している²⁶⁾。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● ガスタービンの高効率化の研究は着実に進められている。 ● エネルギー省のサポートにより、空気分離用酸素分離膜、粉体供給ポンプ、CO₂回収用CO₂分離膜等の様々な応用研究が進められている。 ● エネルギー省は、2016年より、超臨界CO₂サイクル発電技術開発に対して3億ドルのプロジェクトを立ち上げ、商用規模CO₂サイクル実証試験研究を積極的に推進している²⁶⁾。 ● GE社、CB&I社の保有するガス化技術は、これまでに化学合成用を中心に世界各国で数多くの実績がある。 ● 2013年より、Edwardsport IGCCが運転を開始した¹⁷⁾。 ● KBR社のTRIG技術を用いたKemper IGCCが、2016年後半から運転開始される予定である¹⁷⁾。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 大学・研究機関において幅広い基礎研究が行われている。再生可能エネルギーの変動に対応する予備力機能向上の研究が進められている。 ● EUのFP7において、水素リッチIGCC用ガスタービン開発プロジェクトが進められている（17.8Mユーロ）³⁰⁾。 ● 2014年からHorizon2020プログラム（72Bユーロ）がスタートし、CCSやCCU技術開発に関する提案がなされている³⁰⁾。 ● 石炭技術についてはドイツでは支援減少により停滞気味であるが、ポーランドなど他の欧州諸国では着実に研究が進められている。 ● CCS関連研究が盛んに進められてきたが、近年はプロジェクト中止になるものが多い。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 高効率化のプロジェクトは見られないが、石炭火力の負荷変化率向上、運用性向上などについての応用研究が進められている。 ● CO₂削減のためのバイオマス混焼技術が進められている。 ● 欧州のIGCCプラントは、運用停止や解体が決まったものがある。

				<ul style="list-style-type: none"> ● Shell社やSiemens社は、自社IGCCプラントの海外への事業展開を積極的に進めている。 ● 比較的高ランニングコストなGTCC等の最先端高効率火力発電システムは、メリットオーダーによりほとんど運用されない。
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 国としての石炭重視の基本的方向は変わらず、基礎研究は着実に進められている。 ● 海外留学していた人材の積極的な登用などにより、基礎研究力は着実に進展しており、論文数が急増している。 ● 火力分野の国際会議の主催等、最新の研究動向把握と海外研究機関との交流を積極的に進めている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● USC技術については、既に技術輸出国となっている。A-USC技術についても、二段再熱式の積極的な開発を進めている。 ● 国産技術のHCERI炉を用いたGreenGen IGCCが運転を開始し、既に同技術の海外展開を図っている。 ● OMB炉やTU炉等、様々な形式の国産ガス化炉が積極的に開発され、国内で実用化されている。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 大学・研究機関での基礎研究は継続的に行われてきている。 ● 釜山大学でのPusan Clean Coal Center等、産官学連携による石炭燃焼・ガス化研究拠点整備が進められ、基礎的実験研究やシミュレーション技術開発が電力会社の技術者も交えながら進められている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● GTCCやIGCCについては、海外技術をライセンス生産する方式が採用されることが多く、純国産技術の開発が少ない。 ● Taeon IGCCプロジェクトは、2016年より商用運転を予定している。また、2023年商用運転開始を目指すNamhae IGCCプロジェクトが昨年より始動している。これらはいずれも海外IGCC技術のライセンス生産方式である。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) 金子祥三. 日本機械学会誌, 2013, vol. 116, No.1133, p. 10-13.
- 2) 「パリ協定を踏まえた地球温暖化対策の取組方針について」(2015.12.22、首相官邸 地球温暖化対策推進本部)。
- 3) 国家能源局電力司. 「中国の高効率かつクリーンな石炭火力発電の発展における現状と展望」2014年12月。
- 4) 環境省. 福島復興大型石炭ガス化複合発電設備実証計画(広野)に係る計画段階環境配慮書に対する環境大臣意見. http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=24758&hou_id=18364
- 5) 東京電力株式会社、三菱重工業株式会社、三菱商事株式会社、三菱電機株式会社、常磐共同火力株式会社. 福島復興に向けた世界最新鋭の石炭火力発電所プロジェクトの推進に関する基本合意書の締結について. <http://www.mhi.co.jp/news/story/150819.html>
- 6) 次世代火力発電協議会(第2回会合) 参考資料 2. 2015年6月。

- 7) 常磐共同火力株式会社、海外の IGCC プロジェクト。
http://www.joban-power.co.jp/igccdata/igcc/foreign_situation.html
- 8) NEDO 共同研究事業 (固体酸化物形燃料電池等実用化推進技術開発)。2013-2017.
- 9) 次世代火力発電に係る技術ロードマップ 中間とりまとめ. 次世代火力発電の早期実現に向けた協議会. 2015年7月.
- 10) 高効率ガスタービン実用化技術開発(AHAT)に関する施策・事業の概要について. 日立製作所他.
- 11) 発電プラントのゼロエミッション化に向けて. 石炭火力における酸素燃焼技術を用いた CO₂ 回収システム. IHI 技報 Vol.52 No.1. (2012年).
- 12) NEDO プレスリリース、次世代の CO₂ 回収型石炭ガス化複合発電システム開発に着手、2015年8月、http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100421.html
- 13) NEDO プレスリリース、CO₂ 分離型化学燃焼石炭利用技術開発に着手。2015年10月。
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100464.html
- 14) Executive Office of the President. The President's Climate Action Plan, June 2013.
<https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/image/president27sclimateactionplan.pdf>
- 15) 日本経済新聞. 2014年6月23日. 朝刊. 提携先 GE に決定.
- 16) 大崎クールジェン株式会社. 環境影響評価準備書のあらまし。
<http://www.osaki-coolgen.jp/release/aramashi-pdf/aramashi.pdf>
- 17) Thomas W. Overton. Does IGCC Have a Future? POWER, July 2014, p. 54-55.
- 18) Bloomenergy. <http://www.bloomenergy.com/customer-fuel-cell/>. (参照 2014-08-10).
- 19) 日本経済新聞. 2013年12月4日朝刊. 米 GE、日本で火力改修や燃料電池に参入、副会長が表明.
- 20) SunHerald, "Kemper energy facility reaches syngas production milestone", 2016年7月16日
- 21) Gas Technologies Conference 2015, Doosan 発表資料、2015年9月
- 22) 経済産業省、次世代火力発電協議会第6回資料、2016年5月30日
- 23) 石炭ガス化複合発電技術. 電中研レビュー Vol.57 (2016年).
- 24) 大崎クールジェンプロジェクトガイド Vol.1 (2013年).
- 25) SOFC-マイクロガスタービン(MGT)ハイブリッドシステム九州大学向け実証機の運転状況. 三菱重工技報 Vol.52, No.4 (2015年).
- 26) 米国エネルギー省化石エネルギー局
<http://energy.gov/fe/articles/doe-invest-30-million-projects-developing-components-advanced-turbine-and-supercritical>
- 27) 東芝 特集「超臨界 CO₂ サイクル発電システム」
http://www.toshiba.co.jp/tech/review/2013/11/68_11pdf/a10.pdf
- 28) 再生可能エネルギー大量導入時代の系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発。
http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201606/2016000000495.html
- 29) 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)エネルギーキャリア
<http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/>
- 30) European Turbine Network. <http://www.etn-gasturbine.eu/home/>
- 31) NEDO 次世代火力発電等技術開発. http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100115.html
- 32) みずほ銀行 産業調査部レポート. Mizuho Short Industry Focus 第128号 (2015002).

3.3 CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage)

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

CCUS は、火力発電所などから排出される CO₂ を回収し、貯留 (Storage) する技術 (CCS) と有効活用 (Utilization) する技術 (CCU) の総称である。産油国では CCU は石油増進回収 (EOR : Enhanced Oil Recovery) を意味することが多いが、日本、EU では幅広い CO₂ 有効利用全般を指す。ここでは、CO₂ の分離・回収、輸送、貯留、モニタリングの技術および CO₂ 利用技術に関する研究開発を対象とする。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

世界の一次エネルギー消費は、2013 年の石油換算 13,555 百万 t (Mtoe) からレファレンススペースで 2040 年には 18,963Mtoe に達し、石油、天然ガス、石炭の化石資源は 2013 年の 10,980Mtoe (約 81%) から 2040 年 14,791Mtoe (約 78%) になると予想されている¹⁾。

CCS は、地球温暖化対策として発電部門では再生可能エネルギーや原子力とともに、また鉄鋼業やセメント業などの産業部門でも CO₂ 排出削減のための重要な低炭素化技術と位置付けられる。2017 年には世界で 22 の大規模プロジェクトが操業・建設中の見通しであり、その合計の CO₂ 回収量は年間約 40 百万 t (2012 年排出量 32.6Gt) になる²⁾。現状、CCS は高コストであり、太陽光発電に比べれば低コストであっても初期投資が大きく、地下の不確実性に起因するリスクも課題となっている。また、直接的には収益が得られないので、炭素税などの政策的なインセンティブや石油増進回収 (EOR) への利用など付加価値がないと経済的に成立することは困難である。特に、分離・回収部のコストおよびエネルギーペナルティがまだ大きく、低コスト化、高効率化が必要である。また、分離・回収から貯留、モニタリングまでの全体システムおよび貯留における環境負荷の評価のための実証試験が必要であり、中・長期的な視点から研究開発を推進する必要がある。

CCU は CO₂ を廃棄物ではなく資源としてとらえる。EOR を除けば、CCS と比べると CO₂ 削減量は少ないが、CO₂ を有価物に転換することで経済的に自立しつつ CO₂ 削減に寄与できる可能性をもっている。まだシーズ段階であるが、長期的な視点から研究開発を推進する必要がある。

[動向 (歴史)]

1991 年、化石燃料使用で排出される温室効果ガスの削減に関し、技術が果たし得る役割に関する情報を提供することを目的として、CCS に焦点を置いた国際共同研究プログラム「IEA 温室効果ガス R&D プログラム (IEAGHG)」が創設された。メンバー国は日本を含む 15 개국と EU、OPEC であり、14 の多国籍企業がスポンサーとなっている¹⁾。

米国、カナダ、中国、韓国、ペルシヤ湾岸諸国、欧州 (英国、スペイン、オランダ)、ノルウェーで大規模な R&D および導入・展開活動が進められ、オーストラリア、ドイツは大規模 R&D を行ってきたが、導入・展開は停滞している。ブラジル、メキシコでは大規模な R&D、インド、南アフリカでも R&D プログラムが進められている^{2,16)}。

我が国では、2010 年 10 月閣議決定された地球温暖化対策基本法案では、CCS 等の技術開

発や普及促進のために必要な施策を講じるとされ³⁾、2013年9月に改訂された環境エネルギー技術革新計画でも CCS が取上げられた。2014年の第4期エネルギー基本計画では、高効率火力・LNG火力発電の有効活用の促進の中で、「2020年頃の CCS 技術の実用化を目指した研究開発や、CCSの商用化の目途なども考慮しつつできるだけ早期の CCS Ready 導入に向けた検討を行う」とされた⁴⁾。2015年7月の長期エネルギー需給見通しにおいても、2030年度以降を見据えて進める取組の一つとして、二酸化炭素の回収貯留及び利用に関する技術を始めとする新たな技術の開発・利用の推進が発表された⁵⁾。さらに環境省が2015年度にまとめた気候変動長期戦略懇談会における中長期的な戦略の中でも再生可能エネルギーの最大限の導入を図るにあたって、安定的に電力を供給するために火力発電による電力供給の必要性がうたわれ、その場合火力発電については CCS が行わなければならないとされ、2016年5月に閣議決定された地球温暖化対策計画にも明記された。また、2016年6月に資源エネルギー庁が公表した「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」では、CCUSを火力発電からのCO₂排出量をゼロに近づける切り札となり得るとも位置付けて、長期的な視点で戦略的に技術開発を進めるとしている。

米国オバマ大統領が2013年6月に発表した「気候変動行動計画」では、公的金融のクリーンエネルギーへの転換の手法として、後発開発途上国を除き、海外における石炭火力発電所の新設に対する米国政府による公的金融資金を停止する提案を行っている。2013年9月には気候行動計画の一環として、米国環境保護庁（EPA：Environmental Protection Agency）は、大気浄化法に基づく石炭火力発電所の排出基準約500g/kWhを発表した。これは、石炭ガス化複合発電に燃料電池を加えた石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC：Integrated Gasified Fuel Cell Combined Cycle）でもクリアできない厳しいもので、CCSが前提となっている⁶⁾。石炭火力に対しては、カナダではさらに厳しい420g/kWhに、英国でも450g/kWhに制限することが決まっている。

2014年4月にまとめられた、気候変動に関する政府間パネル（IPCC：Intergovernmental Panel on Climate Change）の第5次報告書第3作業部会の報告『気候変動2014-気候変動の緩和』⁷⁾においても、一次エネルギーに占める低炭素エネルギー（再生可能エネルギー、原子力、CCS付火力）を2010年比で2050年に3~4倍近くに増加させる、電力に占める低炭素エネルギーを2010年比で2050年に8~9割まで増加させるとともに、2100年までに、CCSなしの火力発電をほぼ完全に廃止し、高効率天然ガス火力においてもCCSを必要としている⁷⁾。

2015年10月現在、CCSプロジェクトは、操業中15、建設中7、計画中(精査段階)11、合計33プロジェクトがあり、CO₂処理量は合計55百万t/年（計画中のもの約15百万t/年）となる見込みである。国別に見ると、米国12、欧州6、カナダ6、中国4、その他5プロジェクトとなっている^{2,8)}。

CCSを構成する分離・回収、輸送、貯留、モニタリング、利用技術の開発状況は以下の通りである⁹⁻¹¹⁾。

①分離・回収

CO₂の分離・回収は、対象とするガスの性状や目的とするCO₂回収率、CO₂純度などに応じて種々の技術を使い分ける必要がある。分離・回収技術を原理によって分類すると、吸収

法、吸着法、膜分離法、深冷分離法などがあり、吸収法には化学吸収法と物理吸収法がある。対象ガスによって分類すると、燃焼後回収（Post-Combustion）、燃焼前回収（Pre-Combustion）、酸素燃焼回収（Oxy-Combustion、Oxy-Fuel）に大別される。

燃焼後回収は、石炭火力発電所ボイラなどの燃焼排ガスから CO₂ を回収するもので、通常はほぼ大気圧で運転される。排ガスの圧力が低く、CO₂ 濃度も低いので、回収技術としては、通常は CO₂ との反応性が高い溶液による化学吸収法が使われている。燃焼前回収は、化学プラントなどでの水蒸気改質ガスからの CO₂ 除去や、天然ガスからの CO₂ 除去、石炭ガス化複合発電（IGCC：Integrated Gasifier Combined Cycle）など、石炭の部分酸化により生成した H₂、CO、CO₂ などからなるガスから CO₂ を分離・回収するもので、一般に圧力が高いガスに適用されるので、化学吸収法、物理吸収法、物理吸着法が適用される。燃焼中回収は、事前に酸素製造装置により空気中の窒素を除去し、酸素で燃焼することによって燃焼排ガス中の窒素濃度を低く抑え、CO₂ を濃縮して CO₂ 回収を容易にするシステムである。なお、燃焼排ガスから CO₂ を回収するプロセスでは、含まれる酸素、硫黄酸化物、石炭灰などの影響も十分に考慮する必要がある。

ほぼ大気圧で運転される石炭や天然ガスの火力発電所や、セメント・鉄鋼プラントでは化学吸収法が適用されている。化学プラントや石炭ガス化複合発電（IGCC）のような高圧で運転されるプラントでは物理吸収法が有利とされている。化学吸収法には使用するアミン化合物により吸収特性が異なり、高圧に適した吸収液がある。CO₂ 分離では、吸収液から高純度の CO₂ を放散させる「CO₂ の再生」に最も大きなエネルギーを消費する。再生温度は 120°C 程度であり、低品位のエネルギーである。この低品位エネルギーの、システム内での発生方法、あるいは周辺の熱が余剰のプラントからの供給方法によって、経済性に大きな影響を与える。

ガス中の CO₂ を分離・回収する技術を以下に示す。

(i) 化学吸収法

- ・化学吸収法は、アンモニア製造プラントや水素製造プラント、天然ガス処理プラントなどで古くから広く使われ、省エネ、低腐食化などの技術革新が継続して行われてきた（燃焼前回収）。一方、EOR や CCS の必要性が高まるにつれて、燃焼排ガスに適用できる燃焼後回収プロセスが開発され、一部は商業規模で稼働している。
- ・燃焼前回収プロセスとしては、アミン法（MEA 法、MDEA 法など）、熱炭酸カリ法（Benfield 法、Catacarb 法など）がある。条件にもよるが、近年は 1.0 GJ/t-CO₂ 以下と小さい溶液再生エネルギーで運転される例も多い。なお、化学プラントや天然ガス処理プラントでは、CO₂ の分離・回収は製品製造の一過程として行われ、そのコストは製品コストに含まれるので、安価な CO₂ が提供できる。
- ・燃焼後回収法としては、アミン法、アンモニア法（Alstom 社 CAP、Powerspan 社 ECO₂）などがあり、アミン法では日本企業が先行しているとされている。本手法は、排ガス中の不純物（酸素、硫黄酸化物、窒素酸化物）の影響による吸収液の劣化速度が大きく、メイクアップ量が経済性に悪影響を与えるとされていたが、前処理条件の適正化により石炭火力発電所への適用が可能になっている。排ガス条件、吸収液寿命、環境影響を評価する必要があるが、溶液再生に必要なエネルギーは 2.35～3.8 GJ/t-CO₂ とされている。
- ・燃焼後回収法に対する分離・回収コストに関しては、IPCC、IEA、RITE の試算が行わ

れており、IPCC では 29～74 \$/t- CO₂（新設石炭火力発電向 29～51 \$/t- CO₂、既設石炭火力発電向 45～73 \$/t- CO₂、新設天然ガス火力発電向 37～74 \$/t- CO₂）、IEA では、新設石炭火力発電向で 40～74 \$/t- CO₂、RITE では ¥4,256～7,752 /t- CO₂（新設石炭火力発電向 ¥4,256 /t- CO₂、既設石炭火力発電向 ¥7,752 /t- CO₂）と報告されている。排ガスの CO₂濃度、水蒸気タービンからの低品位蒸気の抽気条件によって異なる。

- ・ 燃焼後回収法は、石炭燃焼排ガス中の不純物（酸素、硫黄酸化物、窒素酸化物）の影響による吸収液の劣化などに課題があったが、松島発電所、米国 Barry 発電所（三菱重工）、三川発電所（東芝）、デンマーク Esbjerg 発電所（CESAR, FP7）でアミン法の、米国 Mountaineer 発電所（Alstom）、R.E. Burger 発電所（Powerspan）でアンモニア法の実証試験が行われ、課題解決が図られている。2014 年から開始された Boundary Dam Integrated Carbon Capture and Sequestration Demonstration Project（カナダ）では、Shell/Cansolv アミン系燃焼後炭素回収技術が利用されている²⁰。さらに、米国 W.A. Parish 発電所では商業規模プラント（三菱重工）を建設中で、2016 年に稼働予定である。

(ii) 物理吸収法

- ・ 高温、高圧の石炭ガスから CO₂を分離する場合に適し、Purisol 法（吸収液 N-メチル・ヒロリドン）、Rectisol 法（吸収液メタノール）、Selexol 法（吸収液ポリエチレングリコールのジメチルエーテル）、Flour Solvenni 法（吸収液ポリプロピレンカーボネート）が化学プラントでの CO₂分離技術として商業化されており、この技術が IGCC などにも適用できる。
- ・ IGCC 向けの分離・回収コストに関して、IPCC は 13～37 \$/t-CO₂（新設 IGCC 向け Selexol 法）、IEA は 2005 年～2009 年のデータを元に 18～79 \$/t-CO₂と報告している。
- ・ 米国 2 件（Summit Power、Southern California）、英国 1 件（Hartfield）など IGCC での物理吸収法による実証試験計画が発表されているが、まだ実証運転まで至っていない。日本でも J-power 若松の EAGLE プロジェクトにおいて 2008 年～2014 年にかけてパイロットプラント規模（CO₂回収量 24ton-CO₂/日）の MDEA と Selexol 法の試験を実施した。

(iii) 膜分離法

- ・ 膜分離法は圧力差によって分離を行う技術であり、圧力が高いガスに適用されることが多い。1980 年代に水素回収技術として商業利用され、現在は、井戸元での天然ガス中の CO₂除去にも高分子膜が商業規模で使われている。
- ・ 化学吸収法、物理吸収法に対して消費エネルギーが少ないことが特徴の一つであり、CO₂分離・回収用に、高選択率と高回収率を同時に実現できる高性能膜の研究開発が行われている。特に、セラミック膜など無機膜の研究開発が活発に行われている。
- ・ 燃焼後回収への適用も検討されていて、新設石炭火力発電での分離・回収コストは 83 \$/t-CO₂と試算されているが、未だラボスケールでの試験が中心で、商用化されたものはない。
- ・ 日本では、RITE が、分子ゲート膜構造のコンセプトで H₂、CO₂などの混合ガスから CO₂を選択的に分離する、IGCC への適用を想定した分離膜の研究に取り組んでいて、世界から注目されている。

(iv) 深冷分離法

- ・空気分離、天然ガスからのヘリウム回収、合成ガス中の CO 分離などで実用化されている。工業ガス、保冷用ガスとして広く使われている液体炭酸ガス（液炭）は、加圧下 $-20^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$ で CO₂ を液化・蒸留して製造する。CCS においては、CO₂ の分離・回収に深冷分離法を直接使用することはないが、CO₂ を船舶輸送する場合には、回収された高濃度の CO₂ ガスを液炭に変えて輸送する。

(v) 物理吸着法

- ・水素製造、乾燥空気製造などで広く実用化されている。
- ・容器に固体吸着材を充てんし、圧力、温度を変化させて吸着・脱着を繰り返すスイング法が用いられ、目的に応じて PSA (Pressure Swing Adsorption) 法、TSA (Temperature Swing Adsorption) 法、PTSA 法を使い分ける。水蒸気改質法による水素製造では水素中の CO₂ などを除去するが、近年は化学吸収法に代わって PSA 法が主として採用されている。
- ・固体媒体を移動させる、移動層、流動層方式も検討されている。現状、数 MW 規模プラントでの実証段階であるが、大規模プラントでの適用は周辺の真空機器の容量に限界があり、スケールアップの経済性向上が見込まれず、経済的な競争力向上には吸着剤の飛躍的な性能向上が必要と考えられる。

(vi) 酸素燃焼 (Oxy-Fuel)

- ・酸素を燃焼剤として用い、燃焼排ガス中の水分を凝縮・除去することで濃度 95% 以上の CO₂ を回収する技術であり、他の分離・回収技術と併用する場合もある。回収した CO₂ を燃焼炉に再循環するため、CO₂ Recycle Power Generation とも言われる。
- ・新設石炭火力発電向で 27~72 \$/t-CO₂ との IPCC、IEA の試算がある。
- ・豪州 Callide プロジェクトでは、IHI、三井物産、電源開発、豪州石炭協会、CS energy 社、Schlumberger 社、Glencore 社のジョイントベンチャーにより、経済産業省と豪州連邦政府、クイーンズランド州政府支援の下、2012 年より Callide A 発電所の石炭火力 30 MW 4 号機で実証運転を開始し、2015 年 3 月に累計 10,000 時間の運転を達成して終了した²⁴⁾。CO₂ 回収量は 75 t/日である。
- ・また、スペインでは CIUDEN により、2011 年~2012 年に 30 MWth 級の酸素燃焼循環流動床ボイラの実証試験を行った。米国では、石炭火力での酸素燃焼による CCS 実証プロジェクトである FutureGen 2.0, Illinois が 2013 年に DOE により開始され、130 万 t/年の CO₂ を回収する計画であったが、2015 年にプロジェクトが中止された²⁵⁾。

(vii) 化学ループ燃焼

- ・金属の酸化と還元を利用したもので、2 つのリアクターで金属粒子を周回させることにより、酸素を輸送し燃料の燃焼を行うものである。空気分離を行わずに酸素燃焼が可能となり、理論的に消費エネルギーがもっとも少ない方法とされているが、配管の磨耗、金属粒子の耐久性が課題とされている。
- ・基礎試験の段階であり、CCS への適用を検討できる技術レベルではない。ALSTOM 社が 1~3 MWth 規模でのパイロット試験を実施している。石炭エネルギーセンターと産業技術総合研究所などでは、石炭ガス化を触媒により行うために、NEDO「ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト次世代高効率石炭ガス化技術開発」において、

2009～2013年度にCa系キャリアを使用した燃焼法の検討を行った。東京ガスでは、神奈川工科大学と共同で、2020年までにコプロダクションシステムの実現に向けた研究を行っている。

②輸送

CO₂輸送は、気体、液体、超臨界の状態が考えられる。気体と固体の場合、エネルギー消費が多く、液体よりも経済性が劣る。大規模CO₂回収・貯留プロジェクトでは、パイプライン輸送あるいは船舶輸送が適しており、パイプライン輸送では気体または超臨界状態で、船舶輸送では液体での輸送が行われる。

(i) パイプライン輸送

- ・天然ガス、水素、石油などの輸送用としてパイプラインが世界中に広く敷設されている。米国ではEOR用にCO₂パイプライン網も発達しており、通常は炭素鋼が使われる。水分を含むCO₂は腐食性をもつため材料に耐食性材料を使用する場合もある。また、大規模CO₂の輸送ではリーク検知が行われる。米国では50年以上の実績があり、パイプライン輸送の技術は確立されているといえるが、漏洩事故が0ではない。
- ・日本では、超臨界圧力でのCO₂パイプライン輸送が高圧ガス保安法でまだ認可されたことはない。配管工事が割高になると予想されおり、安全基準の再検討が望まれている。
- ・2015年時点で構想段階から運転中である大規模CCSプロジェクト45件で、パイプライン輸送41件の内、32件は陸域間パイプライン、9件が陸-海域間パイプラインである。輸送距離100km未満が4割あるが、250km以上も2割近くあり、最長は460kmである。

(ii) 船舶輸送

- ・操業中のCCSプロジェクトでは船舶輸送の実績がなく、評価中CCSで韓国の2件（海域深部塩水層貯留）がある。いずれも、石炭火力からのCO₂を回収するプロジェクトである。
- ・実用化では、港の貯蔵設備仕様（貯蔵量、停泊期間）などの検討が必要である。一方、パイプライン輸送では、プロジェクト開始前に排出サイトと貯留サイト、輸送量を確定する必要があるが、船舶輸送ではプロジェクト途中での変更に対応できるという利点がある。
- ・三菱重工は2004年、IEAのGreenhouse Gas R&D Programmeで船舶輸送の検討を行い、1,000km以下の輸送コストを約10\$/t・CO₂、液化、貯蔵、港湾コストが主で、船舶コストの割合は大きくないが、輸送距離の増大に伴い輸送コストの割合が増大すると試算している。(財)エンジニアリング振興協会は、2010年度に実施したNEDOの「革新的ゼロエミッション石炭ガス化発電プロジェクト発電からCO₂貯留までのトータルシステムのフィージビリティスタディ CO₂輸送システムの概念設計」で検討を行っている。千代田化工建設は、シャトル船・海上圧入方式の技術、経済性検証を行っている。
- ・IPCCの検討では、600万t/年の場合、輸送におけるパイプラインと船舶輸送の損益分岐輸送距離を1,000kmとしており、10～15\$/t・CO₂と試算している。RITEでは、国内のパイプライン建設コストが高く、損益分岐距離は190kmで船舶輸送が有利としている。

③貯留

CO₂の貯留のメカニズムは、(a)物理的(構造的・層序的、残留CO₂トラッピング)、(b)化学的(溶解、鉱物トッピング)とされ、貯留期間が長いほど化学的トラッピングの貢献が大きくなるとされている。貯留は、(i)帯水層(深部塩水層)、(ii)枯渇油ガス田、(iii)EOR、(iv)石炭層への炭素固定、(v)海洋隔離がある。現在運転中のプロジェクトは、帯水層(深部塩水層)、EORのみである。海洋隔離は、米国、ノルウェー、日本、カナダなどの国際コンソーシアムにより、現場試験を提案され、ハワイ島沖で2001年に2週間の試験が予定されていたが、環境保護の視点から国際的な海洋実験が中止となった。

日本は、CO₂排出量100年分相当の貯留ポテンシャルがあるとされているが¹⁹⁾、大量のCO₂を貯留できるサイトを特定し、貯留可能量を確度高く推定するために、調査が継続して行われている^{12, 13, 18)}。おのおのの貯留の課題と経済性は以下とされている。経済性については、貯留場所、条件により大きな幅がある。

(i) 帯水層(深部塩水層)

- ・帯水層内の粒子の空隙のあり方によって、注入速度と圧入圧が異なる。高圧による圧入性が課題。ノルウェー他で4件の商用化プロジェクトがある。陸域0.2~6.2 \$/t-CO₂、海域0.5~30.2 \$/t-CO₂。

(ii) 枯渇油ガス田

- ・有望な貯留層であるが、商用段階のプロジェクトはまだない。アルジェリアのIn Salahの天然ガス田では井戸の周辺地帯の地下へCO₂を圧入している。陸域0.5~12.2 \$/t-CO₂、海域3.8~8.1 \$/t-CO₂。

(iii) EOR

- ・米国を中心にほとんどが商業的に成立している(米国7、カナダ2、ブラジル1、サウジアラビア1)。米国の陸上事例で、原油1バレルあたり15 US\$と仮定した場合、-14.8 \$/t-CO₂と試算されている。

(iv) 石炭層への炭素固定

- ・石炭層にCO₂を貯留する技術で、米国、カナダ、ポーランド、中国、日本(夕張炭鉱)での実験プロジェクトがある。メタン回収の収益が見込めるため-20~150 \$/t-CO₂(IPCC 2005)、-5.59 \$/t-CO₂(MIT)の試算がある。実際に注入したCO₂に対してCH₄生産量が予想よりも少なく結果となり、開発は進んでいない。

(v) 海洋隔離

- ・海水温度が低下すると、液体CO₂のほうが密度が大きくなることを利用して、3700 mよりも深い海底に液体CO₂を散布して、ゆっくりと海水にCO₂を溶解する方法と、CO₂を小さな液滴としてか1500 m程度の深海に散布して、液滴が上昇して海面に届く前にCO₂を海水に溶解する方法である。現在は、貯留管理の容易な海底下への帯水層貯留になった。

④モニタリング

モニタリング技術は以下のように整理されており、油ガス田開発の実績が多い、反射法弾性波探査が主流であり、他のモニタリング技術もCCSでの実績がある。経済性については、IPCCの0.03 US\$/t-CO₂やRITEによる海域での事前調査、モニタリング費用の試算がある。

また、地中における CO₂ の挙動を捉えるだけでなく、地表面や海底面への CO₂ 漏洩の検知、モニタリング技術に関する研究も積極的に実施されるようになってきている。例えば英国と日本の QICS 共同研究プロジェクトでは CCS に伴う海底下漏洩を模擬し、2012 年にスコットランド西海岸の Ardmucknish 湾において CO₂ 漏洩実験が実施され、CO₂ 漏洩に伴う潜在的生態系影響についての調査が実施されている²¹⁾。

(i) 地下（貯留層）

- ・ 弾性波探査法：反射法弾性波探査（2D/3D/4D）、弾性波トモグラフィ、VSP 探査
- ・ 地震探査以外/坑内測定：電気/電磁探査、重力探査、物理検層、坑内検層、坑内温度・圧力測定、坑内歪測定、坑内地層水採集、海底地震計（海域）
- ・ 微小振動（極微小地震）観測：坑内地震計

(ii) 地下（浅層）

- ・ 弾性波探査法：反射法高解像度弾性波探査（3D、海域）

(iii) 地表

- ・ 地表傾斜、リモートセンシング、地球化学的調査（pH、p CO₂ 等）、生物学的調査
- ・ 微小振動（極微小地震）観測：地表（または坑内）地震計（陸域）

(iv) 海洋環境調査

- ・ 海況調査、海底（含む気泡）画像撮影、海底土質コア・堆積物調査、地球化学的調査（pH、p CO₂、溶存酸素等）、生物学的調査

⑤ CO₂ 利用

化石燃料から発生した CO₂ を利用して有用物質を製造するよりは、化石燃料から直接有用物質を生産したほうがエネルギー消費量は小さく、経済性が向上する。このような例外として、CO₂ を経由させるルートが CO を経由させるよりも合成反応熱が小さくなる製品として、メタノール、尿素、ポリカーボネート樹脂があり、これらはすでに工業化が進んでいる。メタノールは世界での使用量が、3000 万トン/年、尿素が 1.7 億トン/年、ポリカーボネート樹脂が 300 万トン/年である。これらを原料の CO₂ に換算して合計すると、1.67 億トン/年となる。世界の CO₂ 発生量 329 億トン（2013 年）に対して、約 0.5% となる。

CO₂ 利用技術は、回収した CO₂ を利用し、石油代替燃料や化学原料などの有価物を生産する技術であり、現在、複数の分野で技術開発が進められている。化学原料を製造するプロセスの一例としては、光触媒による H₂ 生成、分離膜による H₂ 分離、そして合成触媒による CO₂ と H₂ からの化学原料製造が挙げられ、3つの段階それぞれに関して触媒や分離膜の研究開発が進められている²²⁾。

日本、米国の開発動向に記載した値から、CO₂ 回収コストを 2000 円/tonCO₂ とし、1 kmol モルの価格は 0.9 円/kmol-CO₂ となる。それと反応させる物質、具体的には H₂ の製造コストを現状の工業用 H₂ の相場 1m³あたり 150 円として 1 kmol モルの価格に換算すると 6720 円/kmol-H₂ となる。この値を比較すると、製造した物質の価格は H₂ 価格からほぼ決まる。CO₂ を原料とした化学合成品では、H₂ あるいは電力のような高エネルギーな物質を使用しなければならず、上述した NEDO の「人工光合成化学プロセス技術研究」³⁸⁾ はその水素製造を行うための水分解触媒の開発に注力しているし、この技術のブレークスルー無しには成立しない。このように見ると、CO₂ の大量利用は、安価な H₂ 製造技術の開発と同

義であると言える。

燃料等の供給用のバイオマスとしては微細藻の生育速度が速いために着目されてきた。バイオマスの生育には、日光、栄養塩、CO₂、O₂が重要である。日光、栄養塩、CO₂、O₂をバランス良く藻類へ供給するには、水の攪拌が重要である。その水の攪拌動力は小さいものの、数ヶ月にわたって行う必要があり、積算するとその動力だけでも微細藻が生み出すエネルギーをオーバーする実験例が多くある。現在は大気濃度 390ppm より高いCO₂濃度としても生育速度がCO₂濃度に比例するわけではないので、生育期間を大幅に短縮できない。微細藻の太陽光の利用効率向上と、生育期間短縮を目指す研究が進められているが、CCUSのCO₂利用先としては、まだ大きな消費先となる展望が開けていない。バイオマス実用化にあたって、NEDOの「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業」³⁹⁾がCO₂固定の事業化の判断を記載する。そのプロジェクトはバイオマスを利用したCO₂利用技術のトータルシステムの開発であり、2010年からスタートした。数年間で成果を評価して次期フェーズへ進むかどうかを決定するというシステムでプロジェクトをハンドリングしている。本プロジェクトでは、2020年においてバイオエタノール製造コスト 40円/L、年産 10~20万kL規模、CO₂削減率 5割以上(対ガソリン)、化石エネルギー収支 2以上という基準で3年ごとに評価し、中止か継続を決定するという評価システムを採用している。ここに、化石エネルギー収支 = (生産されたエネルギー量[MJ]) / (ライフサイクルで投入された化石エネルギー量[MJ])という定義である。

また、CO₂の農業利用に関する研究も進められている²³⁾。オランダではロイヤル・ダッチ・シェルの製油所から排出されるCO₂をハーグ南部の園芸農家の温室に供給している。温室内のCO₂濃度を通常約2倍に高めることで、野菜の成長速度が25%促進される結果が得られている。CO₂は30万t/年で供給されているが、野菜に吸収されるCO₂量に関する情報は明らかではない。

日本でも米国DOEでもEOR以外の回収したCO₂利用を模索している。消化剤、シールドガス、冷媒、CO合成、メタン合成、セメント、ミネラルリゼーション(CaCO₃あるいはMgCO₃)、カフェインや香料の抽出媒体、藻類への転換、炭酸飲料などである。今のところ、従来にない大量利用が可能な活用分野を見出すことができていない。

(3) 注目動向

[新たな技術動向]

日本では基礎研究がパイロット規模の範囲であったために、資金規模が欧米に比較すると一桁小さくてすみ、技術開発が着実に進められている。燃焼後回収のCO₂回収技術に関して、国内の研究資金を活用して、三菱重工業は2008年頃まで10ton-CO₂/日規模の技術開発を国内で試験を行った後、米国のサザンカンパニーと共同で、サザンカンパニーのバリー(Barry)火力発電所においてCO₂ 500ton-CO₂/日の実証試験を2012年~2014年実施した。回収したCO₂は米国DOEのRCSP Phase IIIプログラムで発電所から12マイルにあるシトロネル・ドーム(Citronelle Dome)の地下3,000~3,400mにある帯水層に貯留された。このような実績により、2014年7月にNRGエナジー社(NRG Energy Inc.)におけるCO₂回収の実証規模プラントへ展開した²⁶⁾。

石川播磨重工業は酸素燃焼技術開発を豪州クイーンズランド州の Callide A 発電所で進めた。2006年3月にスタートし、2012年12月～2015年3月まで実験を実施し、のべ5000時間のCO₂回収試験を行い、70 ton・CO₂/日規模の試験を完了した。

燃焼前回収の技術開発は、J-Power と日立製作所が若松発電所において24 ton・CO₂/日規模のMDEAを吸収剤として用いる化学吸収法と、Selexol 吸収液を用いる物理吸収法による試験を2014年3月に完了した。

米国ではCO₂規制が厳しく、CCSを設置しないと石炭火力発電所が規制をクリアできなくなった。オイルシェール田からの天然ガスの価格が安価であり、石炭から天然ガスへの燃料転換を行うと発電量当たりのCO₂発生量が半分となるので、天然ガスへの燃料転換がCO₂削減対策のフロントランナーとの位置付けとなる。米国DOEは総合的なCO₂回収技術の開発拠点としてNCCCを提供して、様々な企業がCO₂回収新技術の開発加速を図りやすい仕組みを作ると同時に、CCS付きの石炭火力発電所の大規模実証プロジェクトは、できるだけ民間活力を生かした形で進めさせる方針で進めている。

EUは国によって発電構成が異なり、フランスのような原子力が主体、英国・イタリアのように天然ガスが主体、ドイツ、東欧諸国のように石炭の比重が高い国等、地域の事情により様々である。EU全体の電力ネットワークと天然ガスパイプライン網により、日本よりも自然エネルギーの導入量増大が容易であり、EUとしては、自然エネルギーへの増加に力を入れている。英国、オランダ、ノルウェーとドイツがCCS技術実証試験計画に熱心であった。2014年7月にEU欧州委員会は第二期プロジェクトとして英国のWhite Rose Project (425MWの石炭純酸素燃焼技術で90%回収して海洋の浅底下へ貯留)を採択した。そのプロジェクトはEUの資金を獲得できたが、2014年11月に英国政府が資金提供しないとの決定をうけて中止状態となった。

中国は、当面は原子力と天然ガスと自然エネルギーを拡大する方針でCO₂削減に努める方向である。石炭火力のCCUS技術開発は複数の大型プロジェクトを発表しているが、いずれも計画中の状態である。

[注目すべき国内外のプロジェクト] ^{8), 14)}

日本

- 日本 CCS 調査株式会社は、実証試験候補地点から、調査進展がもっとも早い苫小牧沖に対して、実証試験計画（案）と貯留層評価書を経済産業省に提出し、経産省は苫小牧沖を実証試験地点として選定した。さらに、2012～2015年度で設計・建設・試運転を行い、2016年から苫小牧 CCS 実証試験を開始する計画を策定した ¹⁵⁾。
- 苫小牧 CCS 実証試験では、2012～2015年度の準備業務を完了し、2016年4月から海底下の貯留層（帯水層）へのCO₂の圧入を開始した。
- 豪州の Gallide A 発電所の酸素燃焼プロジェクトでは、IHI が既設石炭火力を酸素燃焼に改修、2012年よりボイラ運転を開始し、2015年3月に累計10,000時間の運転を達成して終了した。世界初の酸素燃焼パイロットプラントとして成果を上げた。
- 鉄鋼業では、「革新的製鉄プロセス技術開発（COURSE50）」で、コークス炉ガスに含まれる水素を利用した水素還元製鉄、高炉ガスから化学吸収法、物理吸着法によりCO₂を分離回収し、CO₂排出量を30%削減する低炭素製鉄を目指している ¹⁶⁾。

- 日本は燃焼後回収システムの化学吸収法で世界的リーダーであり、三菱重工、三菱日立パワーシステムズ、東芝、IHI、がそれぞれプロセスを開発している。米国テキサス州の PetraNova 大規模 CCS プロジェクト（JX 石油開発、米国 NRG エナジー社共同の大型 EOR プロジェクトで、石炭燃焼排ガス対象の世界最大の CO₂回収プラント、CO₂回収 140 万トン/年、4776 トン/日）では、三菱重工の技術が採用され、2017 年 1 月 10 日に稼働を開始した。他に、燃焼前回収技術を含めて、日本の企業が、アルジェリアの In Salah プロジェクト、米国の Southern Company プロジェクト、ブラジルの Lula プロジェクト、オーストラリアの Gorgon プロジェクトにおいて、CO₂回収設備の設計・建設などで参画している。
- 経済産業省と環境省は、日本近海の大規模貯留層候補地を調査する共同事業を 2014 年度から開始し、継続実施中である。
- 「二酸化炭素地中貯留技術研究組合」が 2016 年 4 月に設立された。2020 年ころの CCS 技術の実用化に向けた安全技術などを開発する。
- CO₂から化学原料を製造する人工光合成について、豊田中央研究所、パナソニック、東芝、三菱化学等の企業が取り組んでおり、低コスト化、高効率化に向けた研究が進められている²⁷⁾。豊田中央研究所では、2011 年の時点においてエネルギー変換効率は 0.04%だったが、2016 年には 4.6%まで高めることに成功している²⁸⁾。

米国

- 構想段階から操業中プロジェクトが 13 件あり、その内 EOR が 11 件であることが特徴である。
- DOE は、CCS 支援策として Regional Carbon Sequestration Partnerships (RCSP)、Clean Coal Power Initiative (CCPI) などに積極的な予算化を行っている。RCSP では、フェーズⅢで、8 件の CCUS 実証プロジェクトを進めている。CCPI では、Summit TX Clean Energy の IGCC/燃焼前回収/EOR の商業プロジェクトを、Petra Nova の石炭火力/燃焼後回収/EOR の商業プロジェクトを進めている。また、Air Products and Chemicals, Inc.がメタン水蒸気改質からの CO₂回収/EOR を 2013 年から行っており、Kemper County Energy Facility が IGCC/燃焼前回収/EOR の商業プロジェクトを、Illinois Industrial CCS Project (ICCS) がエタノールプラントからの CO₂回収/帯水層（深部塩水層）貯留商業プロジェクトを 2016 年から開始することとなっている。

カナダ

- 2014 年 10 月に開始されたサスカチュワン州 Saskpower 社の微粉炭燃焼の石炭火力 Boundary Dam 発電所排ガスからの CO₂回収プロジェクト（EOR、1.0 百万 t/年）は、世界初の発電部門での CCS プロジェクトとして注目されている²⁹⁾。CO₂回収設備の建設は日立製作所が担った。世界で初めての微粉炭燃焼排ガスからの CO₂回収ビジネスである。2014 年から操業に入ったが、当初は予定の CO₂回収量が実現できなかった。それでも Saskpower 社から採算は取れると発表があった。2016 年末に回収量が 100 万 ton・CO₂/年のフル操業となる予定である。回収した CO₂はパイプラインで 66 km を輸送し、Cenovus Energy が EOR として利用している。
- 2015 年に開始された Quest プロジェクトは、オイルサンド改質用の水素を製造する設備

から CO₂を回収し、年間 100 万 t 以上を帯水層（深部塩水層）へ圧入する。

欧州

- 多くの CCS プロジェクトが計画されていたものの、経済危機や CO₂取引価格低下により、プロジェクトが中断あるいは中止されている。
- CCS 資金供給メカニズム（NER300）では、燃焼後 4 件、IGCC 8 件、酸素燃焼 4 件、産業用 4 件など合計 22 件の CCS プロジェクトが申請されている。英国とオランダで活発に研究開発が行われており、両国の申請は 13 件にのぼる。英国では Longannet、Kingsnorth で基本設計（FEED：Front End Engineering Design）が完了しているが、プロジェクトとしての進捗はなく、NER300 に沿って実施する計画である。また、オランダでは ROAD プロジェクトの FEED が完了した状況である。OXYCFB 300 Compostilla プロジェクト（スペイン）は 30 MWth 規模での試験が終了し、Belchatow（ポーランド）では地質学的スクリーニングを進めている。IGCC と天然ガスコンバインドサイクルを併設した Statoil / Snohvit（ノルウェー）が進行中であるが、環境問題により遅延の見込みとなっている。
- 欧州連合において 2009 年に規定された CCS 指令が 2014 年に見直され、2015 年 1 月に最終報告書が欧州委員会に提出された²⁾。CCS プロジェクトが実証から商業への移行を可能にするために、CCS 指令以外の政策が必要であるという所見が示されている。
- Carbon Clean Soluton 社は、新しい燃焼後回収技術として、インドで商業機（6 万トン／年）を稼働し、回収した CO₂を重曹製造に使っている。Carbon Clean Solutions 社は、燃焼後回収用の独自の溶液を開発し、英国の支援を受けて、インド、中東を中心に商業化を進めようとしている。

中国

- 中国華能集团公司（Huaneng Group）主導で、GreenGen プロジェクト（ニア・ゼロ排出型 IGCC ポリジェネレーション）を 2006 年より開始し、2000 t/d 石炭ガス化装置および 250 MW 級 IGCC、石炭を利用した水素製造、水素発電、CO₂回収に関する研究を行っている。
- 豪州連邦科学技術研究機構（CSIRO：Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation）と China Huaneng Group（CHNG）の共同事業として、800 MWe の熱電供給石炭火力プラントの燃焼排ガスから 300 t-CO₂/年を回収するプロジェクトが 2008 年より、Huaneng および TPRI が主導し、660 MWe の USC ボイラの燃焼排ガスから 120,000 t-CO₂/年を回収するプロジェクトが 2010 年より稼働している。
- SKLCC（State Key Laboratory of Coal Conversion）のもと、1995 年より基礎研究を開始し、現在、200～600 MWe スケールの酸素燃焼、100 万 t-CO₂/年を回収し EOR に用いる実証試験の準備を進めている。
- 中国では、精査段階 4、評価段階 2、構想段階 3、合計 9 件のプロジェクトが計画されている。石炭液化（CTL：Coal to Liquid）を含む化学品生産 4 件と半数を占めるのも特徴である。
- 2014 年 11 月に発表された中国・米国両政府による機構変動に関する共同声明（Joint

Announcement on Climate Change) 以降、両国の CCS および CCUS 実施に向けた協力関係が強化されている²⁾。

韓国

- 2010年7月、CCS実証のための包括的なアクション・プランが発表され、2012年~2015年に100MWe級の石炭酸素燃焼の詳細設計、建設を行う計画である。火力発電からのCO₂回収プロジェクト（燃焼前回収あるいは酸素燃焼、燃焼前回収）2件が評価段階にある。
- 浦項産業技術科学院（RIST）は、アンモニア水を利用し高炉ガスからCO₂を回収するプロジェクト研究を行っている。

（4）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

RITEはかつて新規石炭火力では帯水層貯留システムコストを7,300円/t（分離・回収：4,200、輸送：800、圧入：2,300）と見積もった³⁰⁾。CCSの経済試算に大きな影響を与える因子として、回収すべきガスのCO₂濃度・圧力、CO₂再生方法のエネルギー源、CO₂輸送距離と方法、注入井戸のCO₂貯留速度により異なり、だいたい5,000~15,000円/ton・CO₂と試算されている。CCSの経済性を考えた場合、EORによる収益がビジネスモデルで重要視されているものの、将来的な帯水層（深部塩水層）への貯留には、分離・回収における(a)システム効率向上、(b)Oxy-Fuelなどの燃焼法の確立、(c)コスト低減、(d)貯留候補地の特定などが大きな課題としてあげられる。CO₂発生源の特性をうまく利用した分離・回収技術効率化や、システムを考慮した多角的視点からの要素技術開発も重要である。

分離・回収のコストでは再生時の熱消費、昇圧時の電力消費が高コストの要因で、再生工程での熱利用費低減、回収設備費の低減、発電プロセスとの熱統合、昇圧プロセスの効率アップ、などが必要である¹³⁾。CO₂回収については、例えば、燃焼後回収で実用化されているアミン法などがあるが、CO₂回収コストの低減がCCS普及に向けた課題となっており、CO₂回収量数千トン/日の処理能力で、設備費及び運転費（蒸気使用量）を半減できるような吸収液、吸収剤やシステムの改良が求められる。

一方、国内の複数の貯留適地を明らかにし、それら適地の貯留可能量推定の確度を向上するために、貯留層の調査を行い、事業リスクを低減することも重要である。そのための技術は、基本的には石油やガスの探鉱技術が利用できるが、CCS特有の要素があるので、知見の集積と手法の改良・開発を行う必要がある。また、圧入したCO₂の地下での長期間に及ぶ鉱物化の挙動を推定するための地化学反応に関する研究も求められる。

負荷変動対応については、IGCCに適用するCO₂回収技術が数十年にわたって化学プラントにて運用された技術であり、負荷が変動しない定常運転では大きな課題がないと予想されるが、今後の課題は、圧力、ガス量の変動した際のCO₂回収装置の負荷変動対応と応答速度向上にある。米国の負荷変動火力は石炭火力に比べると負荷変動特性の良い天然ガスコンバインドサイクル発電が担っているが、日本はエネルギーセキュリティのために天然ガスと石炭火力をほぼ同程度の割合にするという方針で進めている。石炭火力に課せられた負荷変動対応を天然ガス火力と同等のミドルピーク対応にさせるといふ、海外よりさらに上載せし

た技術開発が必要とされている。

CO₂の利用という観点からは、回収した CO₂を C1 炭素原料として有効に活用する技術開発や、ケミカルポテンシャルの低い CO₂を新たな CO₂の発生を伴わずに化合物に組み込む技術開発、化合物の C-H 結合の活性化により直接 CO₂を結合させる技術開発などが課題である。ラボレベルでは実用化に必要な変換効率に迫る手法も開発されつつあるが、コストおよびエネルギー密度の観点から、短中期的に CO₂地中隔離と同等の CO₂削減の量的寄与を実現することは困難であり、中長期的な技術開発が望まれる。また、CO₂利用については、尿素増産等があるが、大量 CO₂の用途としては EOR に限定されている。大量 CO₂を原料とする高付加価値物質の製造技術の実用化、農業分野及び漁業分野への CO₂の有効利用が促進されれば、国内での CCUS の実用化も有望になってくると考えられる。

[今後取り組むべき研究テーマ]

CCUS の普及に向けては、低コスト CO₂回収技術開発、貯留時の安全管理技術、大量 CO₂の有価物への転換技術の開発が求められる。また、長期的には再生可能エネルギーの利用が拡大し、余剰電力と化石燃料由来 CO₂を組み合わせた燃料リサイクル技術(Power to CH₄ or CH₃OH)の開発が必要となる可能性がある。

- CO₂回収コストの低減に関する技術開発、アミン法については蒸気使用量削減を可能とする熱利用プロセス開発、設備の小型化・簡素化を可能とする気液接触装置・熱交換器の開発、CO₂吸収容量が大きく、CO₂脱離エネルギーが小さい吸収液や吸収剤の開発
- 高効率な温室効果ガス分離膜の開発、従来方法とは大きく原理が異なる、回収エネルギー低減が期待できる革新的な CO₂分離技術の基礎研究
- CO₂分離技術を組み込んだ微粉炭燃焼あるいは IGCC 発電システムの負荷変動特性のチャレンジングな技術開発
- 回収 CO₂を還元する物質の経済的な製造方法、触媒による反応速度の向上、反応器・反応システム改善による反応収率向上
- CO₂貯留層の貯留速度、貯留容量を精度よく予測する技術の確立
- CO₂貯留層からの CO₂貯留状況および CO₂漏洩に関する低コストかつ長期モニタリング技術開発
- 精度の高い地質判定技術、地化学反応推定技術
- 高効率な温室効果ガス変換触媒、変換デバイス、バイオ技術等の開発
- CO₂回収・輸送・貯留の安全性を担保するための研究
- CO₂の有価物への転換技術、CO₂を原料とする新規化学反応経路及び触媒の開発、再生可能エネルギーからの水素製造の実用化並びに大型化

（５）政策的課題

CCUS は、地球温暖化対策の重要な一方策として認知され、且つ CO₂回収・貯留の要素技術としては確立しているものの、地球温暖化問題への対応に特化した CCS は、外部不経済であることから、市場原理だけでの導入を見込むことができない。現在、事業者へのコスト・リスク負担が重く、普及に至っていない状況にあり、研究開発意欲を減退させない施策が必

要である。また、事業者への CCUS 実施の動機付けとしては、CO₂ 排出基準規制、固定価格買取制度、炭素税、排出量取引制度等、事業者にインセンティブを与える施策を行っていく必要がある。例えば炭素税導入のノルウェーでは、1996 年から実施されている Sleipner における大規模な CCS プロジェクトにおいて、炭素税を回避するというインセンティブが大きく影響している。さらに、CCS の広範な普及には、国内貯留地点の特定、貯留可能量の把握、鉱業法・鉱山保安法に相当する法規制の整備、国民理解の増進に向けた取組が求められる。

地震の多い国内での CO₂ 貯留には抵抗が大きいことが考えられることから、海外での CO₂ 削減が排出権取引により国内での削減に結び付く枠組みの構築も重要である。例えば、CO₂ の利用あるいは貯留方法が、国際的な枠組みで CO₂ 削減事業がビジネスとして成立するためには、先進国が途上国に対して CO₂ 削減を行う際の Win-Win な仕組みの制定、および環境保全を図るための環境インパクトの評価方法、ガイドラインおよび規制のあり方を国際的に合意していく必要がある。グローバルな CO₂ 削減を効果的に実施するには、企業間競争力による技術開発だけでは難しく、例えば、COP 事務局が先進国の資金をキープして、途上国に導入する CO₂ 削減設備の導入に関する発注者となり、入札結果を基に CO₂ 削減効果の高い設備から導入するといった新たな仕組みを構築することも一案である。そのような途上国にとっても、入札企業にとっても、資金提供した国々にとっても、透明性ある仕組みの導入に、日本が積極的な貢献を行うべく、政策立案の検討が必要になってくると考えられる。

回収 CO₂ の有効利用に関しては、研究開発の促進に加えて、回収 CO₂ の有効利用に対してのインセンティブを与える施策を行っていくことが望まれる。

（6）キーワード

CCUS、分離・回収、輸送、貯留、モニタリング、CO₂ 利用、Pre-Combustion、Post-Combustion、Oxy-Fuel、化学吸収法、物理吸収法、物理吸着法、膜分離、深冷分離、化学ループ燃焼、帯水層、EOR、人工光合成、微細藻類、バイオ燃料、光触媒

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● CO₂回収プロセスについては分離回収手法の開発が継続されている。CO₂ 地中隔離プロセスではCO₂注入後のモニタリングやCO₂漏洩検知に関する研究が広がっている。CO₂有効利用については、人工光合成などの分野において、世界をリードする研究が継続されている。 ● RITEは膜法と貯留関連の技術開発を実施している。 ● CO₂分離膜として、産総研は、安価な材料(ポリフェニレンオキシド)から優れた分離性能と柔軟性を持つ新規中空糸炭素膜を開発し、低コストで破損しにくい膜モジュールの開発に世界で初めて成功。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● RITEは、2000～2004年に新潟県長岡市で帯水層へのCO₂圧入試験とモニタリング技術開発等を行った。その後もモニタリングは適宜行われている。 ● 経済産業省「二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業」で、夕張市の炭層へのCO₂ 圧入実験を2002～2007年度まで実施した。 ● 三菱重工は、関西電力と共同開発したKS-1吸収液の実証を行い、RITE および電源開発の協力を得て、松島石炭火力発電所で2006年～2008年10

				<p>t/日、5,000時間以上の連続運転実証を実施。東芝は、2009年より三川発電所内で石炭火力発電所から高性能の吸収液の実証を開始。2011年より、米国Alabama PowerのBarry発電所で、500 t/日のCO₂回収・貯留実証試験を開始している。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● IHIは、1989年より酸素燃焼の研究開発を開始し、1990年代に基礎研究およびFSを行い、2008年～2015年に豪州Callide酸素燃焼プロジェクトに参画した。2015年以降の商用化を目指している。 ● 東芝は、2009年に燃焼後回収プロセスのパイロットプラントを福岡県大牟田市に建設し、運転を行っている。 ● 海外のプロジェクトに多くの企業が参画している。 ● 国内では経済産業省の委託で日本CCS調査が2016年に苫小牧CCS実証試験を開始した。商業化は未実施である。 ● 経産省と環境省は共同事業として、2014年度から貯留適地調査を行っている。 ● 三菱重工は米国で石炭火力からの燃焼後回収商業プラントをEOR用に建設中で、2016年稼働開始予定である。 ● RITEと鉄鋼5社がCOURSE50プロジェクトで開発・実証した吸収液を新日鉄住金エンジが商業化し、新日鐵住金室蘭製鉄所で1号機が稼働した。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● DOE（米国エネルギー省）のNational Energy Technology Center(NETL)、National carbon capture center(NCCC)が企業主体のポストおよび燃焼前回収技術開発を支援している。 ● アメリカ合衆国大統領選挙の結果によっては、CO₂削減に関連する政策に大きな変化が生じる可能性もある。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● DOEのCCS支援策RCSP、CCPIなどで予算化し、商用化にむけての実証試験を行っている。 ● 現在稼働中または建設中のCCSプロジェクト22件中14件が米国、カナダで行われている。EORを中心に、カナダとともに現在もっとも積極的にCCSを進めている。 ● DOEはRegional Carbon Sequestration Partnerships (RCSP) で全米を7つの地区に分けて企業組合が主体とする貯留サイトの調査を実施している。 ● US DOE Clean Coal Power Initiative (CCPI)で大規模実証プロジェクトを2件支援している。 ● 米国内にはEOR用のCO₂パイプライン網が整備されている。 ● カナダでは、世界で初めて石炭火力発電所のCO₂を商業規模で回収、EOR用に販売している。 ● カナダではオイルサンド改質用の水素製造時に発生するCO₂を回収し、帯水層への貯留を開始した。 ● 米国、カナダでは、石炭火力に対して厳しいCO₂排出量基準を設定している。
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● Horizon2020で吸収液、セメント製造工程からのCO₂回収技術を支援している。 ● オランダでは農業分野におけるCO₂有効利用の試みがなされている。 ● KCRCとRISTが吸収液、酸素燃焼の基礎研究を実施している。
	応用研究・開発	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> ● 多くのCCSプロジェクトが計画され、世界をリードしていたものの、経済危機やCO₂取引価格低下により停滞しており、一部中止もされている。 ● 操業が確定している新規の大規模CCSプロジェクトが無く、2020年頃に実施が計画されているプロジェクトを精査中。 ● 英国では、石炭火力に対して厳しいCO₂排出基準を設定している。 ● EUでは、EU指令で、300MW以上の火力発電に対してCCS readyのFSを求めている。英国はさらにCCS readyを義務付けている。
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● EORを想定したCCSの研究が見られる。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 合計9件のプロジェクトが計画されており、石炭液化（CTL：Coal to Liquid）を含む化学品生産4件と半数を占める。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● KCRCとRISTが吸収液、酸素燃焼の基礎研究を実施している。 ● CCSに関する世界最大級の学術会議であるGHGTにおいて、顕著な発表が見られない。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 2013年にKCRCは500MWの酸素燃焼、あるいは300MWのIGCCのCCS計画を発表するが、その後国内での具体的なCCSプロジェクトの計画が見られない。 ● Doosan Heavy Industry and Constructionsは吸収液プラントも検討していたが、現在は酸素燃焼技術開発を実施中と表明している。

- (註1) フェーズ
基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル
応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル
- (註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。
◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている
△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない
- (註3) トレンド
↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) アジア・世界エネルギーアウトック 2015. (財)日本エネルギー経済研究所. 2015年10月.
- 2) 世界の CCS の動向. 2015 サマリーレポート. GLOBAL CCS INSTITUTE. 2015年11月.
- 3) 地球温暖化対策基本法案. 2010年10月.
- 4) エネルギー基本計画. 経済産業省. 2014年4月.
- 5) 長期エネルギー需給見通し. 経済産業省. 2015年7月.
- 6) 米国による海外石炭火力発電所新設に対する公的融資制限及び規制案の評価. (公財)地球環境産業技術研究機構 (RITE) システム研究グループ. 2014年10月.
- 7) Climate Change 2014. Mitigation of Climate Change. IPCC. 2014年4月.
- 8) The Global Status of CCS Project Database. GLOBAL CCS INSTITUTE. 2015年10月.
- 9) 二酸化炭素回収・貯留に関する IPCC 特別報告書(日本語版). GLOBAL CCS INSTITUTE. 2013年9月.
- 10) IPCC. Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. 2005年.
- 11) 環境省. 平成25年度シャトルシップによる CCS を活用した二国間クレジット制度実現可能性調査委託業務報告書国内外の技術動向調査. 2014年3月.
- 12) 二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発事後評価報告書. 産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会. 2010年3月.
- 13) RITE. 日本における地中貯留の経済評価と有効性. CCS ワークショップ 2007 資料. 2007年2月.
- 14) John Gale. 世界の CCT/CCS 開発の概要. J-COAL CCT セミナー. 2012年6月.
- 15) 日本 CCS 調査株式会社. 苫小牧 CCS 実証試験の概要と現況について. CCS のあり方に向けた有識者懇談会. 2013年6月. 環境管理「苫小牧 CCS 実証試験」Vol.52 No.3. 2016年3月.
- 16) 日本鉄鋼連盟. 総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会省エネルギー小委員会 (第7回) 資料「日本鉄鋼連盟説明資料」. 2014年12月.
- 17) IEAGHG. <http://ieaghg.org/about-us>
- 18) 経済産業省. 平成28年度二酸化炭素貯留適地調査事業に係る入札可能性調査実施要領
http://www.meti.go.jp/information/publicoffer/kobo/downloadfiles/k160127002_01.pdf
- 19) RITE. 平成17年度二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書 (貯留ポテンシャル)
- 20) 世界の CCS の動向. 2014. GLOBAL CCS INSTITUTE.
- 21) RITE. CCS 安全性評価への取り組み. <http://www.rite.or.jp/co2storage/safety/>
- 22) NEDO. 二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発.

- http://www.nedo.go.jp/activities/EV_00296.html
- 23) 日本経済新聞, 2013年2月20日
- 24) J Power. 2015年3月2日ニュースリリース
http://www.jpowers.co.jp/news_release/2015/03/news150302.html (Callide 関連)
- 25) IEEJ. <http://ieej.or.jp/2015/05/special201504009/> (FutureGen 2.0 関連)
- 26) 三菱重工. 石炭燃焼排ガスを対象とした世界最大の CO₂回収プラントを受注,
<http://www.mhi.co.jp/news/story/1407155547.html>
- 27) 日本経済新聞, 2016年4月18日.
- 28) Takeo Arai, Shunsuke Sato and Takeshi Morikawa, Energy Environ. Sci., 2015, 8, 1998-2002.
- 29) The world's first POST-COMBUSTION COAL-FIRED CCS FACILITY.
<http://saskpowerccs.com>
- 30) RITE. 日本における地中貯留の経済評価と有効性. CCS ワークショップ 2007 資料. 2007年2月.

3.4 新型原子炉

（1）研究開発領域の簡潔な説明

主に高速増殖炉、高温ガス炉などの第4世代原子炉についての研究開発領域である。ここでは、第4世代炉、次世代軽水炉、小型炉についての研究開発動向を記載する。特に、第4世代炉については、技術開発の成熟度と海外動向を考慮して、ナトリウム冷却高速炉、高温ガス炉を中心に記述する。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

原子力基本法に謳われた原子力利用の目的である、「将来におけるエネルギー資源の確保し、学術の進歩と産業の振興とをもって人類社会の福祉と国民生活の水準向上とに寄与する」ことに加えて、現状の科学技術では再生可能エネルギーの利用拡大において供給安定性と経済性の観点から限界があること、地球環境保全の観点から地球温暖化ガスの排出制限を行わなければならないこと、などを鑑みると、エネルギー資源の乏しい我が国としては、新型原子炉の開発が一つの選択肢として浮上してくる。

また、エネルギー基本計画（平成26年4月）¹⁾では、高速炉や加速器を用いた核種変換、プルサーマルの推進等も見据えた高速炉などの研究開発、水素製造を含めた多様な産業利用が見込まれ、固有の安全性を有する高温ガス炉など、新型原子炉に関しての言及がある。

一方、世界的には、中国やその他のアジア諸国、中東諸国などでは、人口増加と工業化の進展などから依然としてエネルギー消費量の大幅な増加が続いており、世界のエネルギー消費量は長期的に見れば着実に増え続けていく。現在、世界で使われているエネルギー資源の約90%は化石燃料であるが、埋蔵量の多くが中東に集中しているため、政情などによりエネルギー供給は不安定になる可能性がある。また、化石燃料の使用は大気中の温室効果ガス濃度を高めるため、第21回国連気候変動枠組み条約締約国会議（2015年12月）にて地球温暖化防止対策の新たな枠組み「パリ協定」を採択し、すべての国が温室効果ガス排出削減に取り組むにことになっている。この様な状況の中、我が国では、震災以降、原子力発電停止に伴う化石燃料の大幅輸入による電気代の値上がり（産業界では3割増）や再生可能エネルギー導入による賦課金が増加していることを踏まえて、政府は2015年7月に「長期エネルギー需給見通し（エネルギーミックス）」を定めた。その中で、原子力発電依存度は20～22%とされ、この規模を維持するためには、今後廃炉となっていくものに代わって新たな原子炉を新設していくことが示唆される。

世界的に見れば中東産油国を含め原子力発電の新規導入を計画している国が多数あり、我が国のみならず世界のエネルギー供給安定性や地球温暖化防止等を図るためにも、高速増殖炉、高温ガス炉などの第4世代原子炉ならびに将来の原子力エネルギー・システム及び周辺核燃料関連技術に関する学術の進歩を成し、長期的展望の下に実用発電に供するべく新型原子炉に係る研究の進展ならびに技術の確立を図ることの意義はきわめて大きい。

[動向（歴史）]

2030年頃からの実用化を目指して、安全性や経済性に優れた第4世代原子炉の研究開発が

米国エネルギー省より提唱され、第4世代原子力システムフォーラム（GIF：Generation-IV International Forum）の枠組みが作られた。GIFでは、発電用原子炉の世代は次のとおり定義された²⁾。

- (1) 第1世代（Gen-I）
1950年代から1960年代前半に運転を開始した初期の原型炉
- (2) 第2世代（Gen-II）
1960年代後半から1990年代前半に建設された商業用原子炉
- (3) 第3世代（Gen-III）
1990年代後半から2010年代頃に運転開始した原子炉で、第2世代の改良型として開発された原子炉
- (4) 第4世代（Gen-IV）
現在、研究が進んでいる原子炉で、高い安全性、火力発電所と比肩できる経済性、放射性廃棄物の負担の最小化および高度な核拡散抵抗性などの特徴をもつ革新的原子炉

ソ連のオブニンスク原子力発電所が、世界初の商用原子力発電所として稼働して以来、発電用原子炉は進化し続けている。現在の主流は軽水炉であり、第2世代と第3世代の原子炉とされる。これらの研究開発を通じて、建設コスト低減のための標準化や先進的な安全方策を取り入れた次世代軽水炉（第3世代+）の技術が確立されつつある。さらに、原子力発電所建設の投資リスク回避や局所電源ニーズに応えるため、小型原子炉が注目されている。また、革新的原子炉として高度の安全性、持続可能性、良好な経済性等を開発目標とした第4世代炉の中でもナトリウム冷却高速炉と高温ガス炉は、1950年代から研究開発が進められており、もっとも実用化に近いと考えられている。以下に、これら新型炉の研究開発動向について記載する。

● 次世代軽水炉（Gen-III+）

基本的に次世代軽水炉は第3世代炉の改良版と位置づけられ、炉心損傷頻度の低減、建設コスト削減や建設工期の短縮化、長寿命化、高燃焼度化、航空機落下対策などを実現するものである³⁾。従来設計と大きくなる点は受動的な安全性を取り入れたことである。受動的な安全とは、異常時に電源駆動機器による制御や運転員による介入なしに自然循環などの物理現象によって事象進展を防ぐ概念である。米国の原子炉である AP1000⁴⁾や ESBWR⁵⁾にはこの概念を積極的に設計に取り入れている。AP1000は、2011年に米国規制当局 NRC（Nuclear Regulatory Commission）から設計認証を受けた。その際、規制当局より、AP1000の設計は簡素化され、固有、受動的あるいは革新的な安全およびセキュリティ機能を有することで安全余裕を向上させており、有意な放射性物質放出なしに航空機衝突に対して耐えることができると評価された。我が国でも2009年に次世代軽水炉（第3世代+）の開発に着手し、濃縮度5%超燃料、免震技術、80年寿命のための新材料と水化学、建設工期短縮のための建設技術、パッシブ・アクティブ技術の最適組合せ、プラントデジタル化技術を枢要技術に掲げた⁶⁾。原子力委員会は2010年にこの取組みを評価し、プロジェクトの着実な進展を求めていた⁷⁾が、2011年3月の福島第一原子力発電所事故以降は、その開発を安全研究に特化した計画に修正した状況である。

- 小型炉（小型モジュラー炉、受動的・固有安全炉）

IAEA の定義によれば、出力 30 万 kW_e 以下が小型炉、70 万 kW_e 以下が中型炉とされている⁸⁾。小型炉では、出力あたりの建設コストは高くなるが、投資リスクは低くなる。また、大きな電気出力を必要としない電気料金の高い地域では、小型炉は発電競争力を有している。さらに、水素製造や熱利用などの多目的利用を可能とする。機器が小型であることから、工場製造および機器輸送が容易であり、現地工事が少なく建設工期を短くできるメリットがある。機器の標準化によって複数基設置のモジュラー型を志向することも可能である。また、受動安全や固有安全を取り入れた設計が多いのも特長である。2011 年時点で、世界に 125 基の小型炉があり、28 か国で 17 基が建設中である。米国では 2012 年に mPower 設計を選択し 5 年間の開発資金援助することになった。2013 年には 2 回目の開発提案申請を受け付け、NuScale が選択された。中国では小型高温ガス炉、インドでは重水冷却炉の開発がなされてきた。ナトリウム冷却小型炉は、米国にて 1989 年に PRISM と SAFR、我が国では寿命期間中に燃料交換不要という特徴を有する 4S 炉（東芝）の開発が進められた。

- 第 4 世代炉（Gen IV）

第 4 世代炉とは高い安全性・信頼性の実現などを開発目標とした革新的原子炉であり、2002 年にナトリウム冷却高速炉、ガス冷却高速炉、鉛冷却高速炉、超高温ガス冷却炉、超臨界圧水冷却炉、熔融塩炉の 6 炉型が選定された⁹⁾。ナトリウム冷却高速炉は、フランス、ロシア、インド、中国、韓国および EU（European Union）は積極的に研究開発を進めている。我が国は熔融塩炉以外の研究開発に携わっている。

- ナトリウム冷却高速炉

ナトリウム冷却炉の開発の歴史は長く商業的にも電力供給運転をしており、400 炉年（原子炉数×稼働年）という水炉に次ぐ運転経験を有している原子炉である。高速炉は高速中性子を燃えないウラン 238 に吸収させることで燃えるプルトニウム 239 に変えることによって燃料を増殖させることが可能である¹⁰⁾。また、放射性毒性が強く寿命の長いマイナーアクチニドの核変換ができ、高レベル放射性廃棄物を減量させることができる特徴を有しており¹⁰⁾、その重要性はエネルギー基本計画¹¹⁾に記載されている。この炉は、ナトリウムの沸点が高いという特徴により、原子炉を低圧システムとすることができる。従って、単相ナトリウムで炉心冷却ができ、自然循環による電気駆が不要な崩壊熱除去が可能である。一方、ナトリウムは水や空気と接触すると急激に反応する特徴がある。

米国では、EBR-I、EBR-II、Fermi-I、FFTF などの実験炉を建設し多くの実験データを取得したが、原型炉建設時に核不拡散政策により大型炉開発は中止された。フランスでは、実験炉 Rapsodie、原型炉 Phenix、実証炉 Superphenix を建設し、開発を進めてきたが、政治的理由により 1998 年に Superphenix を廃炉にした。ロシアでは、実験炉 BOR-60、原型炉 BN-350（カザフスタン）、実証炉 BN-600、商業炉 BN-800 と開発を進めてきた。中国およびインドも実験炉の建設・運転に達している。

- 高温ガス炉

高温ガス炉の開発の歴史は古く英国、米国、ドイツで先行したが、トラブルにより欧米では開発が衰退状態に陥っていた。その後、米国において 1990 年代に安全性と経済性を向上させた GT-MHR の設計が行われ、2000 年代に原子力 2010 プログラムや NGNP プロ

グラムなどを発表し、水素利用の検討に着手した。中国ではペブルベッド型（後述）実験炉 HTR-10 を建設し、2003 年に定格運転を達成した。実証炉 HTR-PM は建設中で、2017 年に建設完了予定であり、本格的な実用化展開を図っている。一方、南アフリカではペブルベッド型の PBMR 建設を推進していたが、2009 年に経済的理由により中止になっている。

我が国では実験炉 HTTR が建設され 2004 年に 950°C で定格運転を達成した¹¹⁾。水素製造技術も併せて開発している。HTTR は、黒鉛減速ヘリウム冷却熱中性子炉であり、ガスタービン発電と工業プラントが併設される場合が多く、熱電併給の役割を担う。製鉄などの産業熱源に加え、水素製造や石炭液化などの利用が期待される。セラミックスで被覆した粒子状燃料を用いることが特徴的で、1600°C の高温状態においても被覆材の閉じ込め機能は損なわないことが実験的に示されている。被覆粒子燃料の封入方法によりブロック型とペブルベッド型の燃料体に分類できる。ヘリウムガスは 100 気圧以下に加圧するが、ヘリウムの漏えい事故が生じても黒鉛減速材の熱容量が大きいため燃料温度は急激に上昇しない固有の安全特性を備えている¹²⁾。

なお、超高温ガス冷却炉は高温ガス炉を発展させたもので、出口温度は 950°C 以上を念頭に設計されている原子炉である。

（3）注目動向

[新たな技術動向]

我が国は、第 4 世代炉としてナトリウム炉である JSFR の開発を実施したが、中断している。現在は、2014 年 5 月締結の日仏高速炉協力に基づきフランスとの協力のもとで ASTRID の開発を進めている。ロシアでは実用炉 BN-1200 が建設中である。ナトリウム炉の安全基準について、ロシアも含め国際的に調和した安全性を要求する動きがある。

ガス冷却高速炉は、フランス主導で欧州中心に ALLEGRO の研究開発が進められている。我が国では、高温ガス炉について資源国カザフスタン等との研究協力や HTTR を用いた安全性試験国際共同研究プログラムを実施するなどの動きがある。2014 年には新規制基準に対する適合性審査を申請して、早期運転再開を目指している。

鉛冷却高速炉は、ロシアで BREST-300 と SVBR-100 が進められており、BREST-300 は設計を終了し 2020 年以降に運転を予定している。また、欧州では ALFRED プロジェクトが推進されるとともに、ベルギーで燃料・材料試験を目的とした MYRRHA 炉の設計研究が実施されており、我が国の加速器駆動システム (ADS)¹³⁾との協力を探る動きがある。さらに、韓国が 2015 年に GIF 覚書に署名し、PEACER 開発に着手しており、米国と中国も設計を進めている。

トリウム液体を燃料とする熔融塩炉は、米国で実験炉を建設した実績があり、最近はいくつかの国で研究開発が開始されている¹⁴⁾。トリウムを資源（レアアース採掘時の残渣として発生）にもつ中国では 2020 年頃臨界予定のトリウム熔融塩炉開発計画がある。米国では 2016 年に開発支援を発表している。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

次世代軽水炉については、国外では実用化段階である。福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえてバックフィットが行われているが、安全性の高い次世代軽水炉開発プロジェクトが期待される。

小型炉については、米国では 2012 年に小型モジュラー炉認可支援プログラムに加え、民間では、ビル・ゲイツ氏をオーナーとするテラパワー社が 2008 年に TWR と命名した新たな原子炉開発を開始した。TWR の基本炉型は金属燃料ナトリウム冷却高速炉で、過渡時の安全性や電源喪失の除熱性能の高い固有安全炉で、実用化に向けて研究機関と産業界との国際協力で開発を進めている。また、2015 年 9 月にはテラパワー社は中国 CNNC と共同開発するための覚書を署名した。小型炉については、重大事故に係る技術的課題が規制当局より指摘される一方、米国エネルギー省はサイト認可手法と手順の確立も重要と考えており、有望な技術である。

ナトリウム冷却高速炉については、フランスではプロトタイプ炉の設計・開発を進めている ASTRID プロジェクトを推進しており、欧州における開発を先導している。ロシアでは BN800 が 2015 年 12 月に送電開始し、2016 年 5 月に 95%出力を達成、2017 年には商業運転に入る予定である。また、BN1200（商用炉）は 2016 年に設計終了の予定であり、現在建設中の多目的高速炉 MBIR は 2020 年運転開始の予定である。中国では、実験炉 CEFR がメンテナンスを含めて運転中であり、実証炉 CFR600 が 2018 年に設計終了予定である。韓国では、原子力研究開発事業の中でナトリウム炉の予算が全体の半分を占めるほど重点化して、プロトタイプ炉 PGSFR の設計を進めており、2028 年に燃料装荷を行うとしている。インドでは、2015 年、原型炉 PFBR が完成した。さらに、同サイトに 2 基を建設し、別サイトに 2 基を建設する計画である。

高温ガス炉については、米国では、NGNP プロジェクトが立ち上がりフェーズ 1（2005～2010）でプラント概念設計検討が終了したが、フェーズ 2（当初は 2011～2021；プラント詳細設計、許認可、建設、運転実証）に移行できないでいる。欧州では、過去の実績を踏まえて欧州圏内に建設して実用化をリードしたいと考え、いくつかのプロジェクトを立ち上げている。

英国 AMEC フォスターウィーラー社は中国核工業建設集団公司（CNEC）と高温ガス炉協力に関する覚書を 2016 年に締結した。中国では、実証炉としてペブルベッドモジュール型の HTR-PM が 2012 年から建設中であり、原子炉容器が 2016 年に到着し、2017 年には送電開始予定である。韓国では、原子力水素開発実証計画フェーズ 2 が 2012～2016 年で進められており、原子力研究開発予算の中では 2 番目に重要な項目となっている。インドネシアでも高温ガス炉導入が検討されており、実験炉の基本設計はロシアが 2015 年に落札している。

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

次世代軽水炉については、2013 年に施行された規制基準に適合するためにはシビアアクシデント対策などの安全性向上技術、原子力政策の明確化が課題としてあげられる。小型炉に

については、商用炉としての実証が課題である。

ナトリウム冷却高速炉については、安全性と信頼性を向上させる技術開発、コスト低減のための革新技術のデータ取得が課題として残っている。高温ガス炉については、「HTTR」を用いた技術実証や併設水素製造技術開発に加えて、安全性向上技術とシビアアクシデント研究、新たな燃料開発など燃料の超長期安定性の課題があげられる。

ナトリウム冷却高速炉と高温ガス炉を除く第4世代炉については、技術的課題が多く実用技術確立までには大きな距離がある。鉛冷却高速炉については、放射性廃棄物低減を目的とした加速器駆動システム（ADS）の成果と共有できる可能性があるが、材料腐食を始めとしてプラントとしての技術確立には安全性や保守補修などの課題が残る。熔融塩炉については、材料の長期健全性、化学状態制御、大型熱交換機器などが課題としてあげられる¹⁵⁾。

[今後取り組むべき研究テーマ]

ナトリウム冷却高速炉については、機器の性能や設計の妥当性・裕度を確認する重要な段階であり、データの蓄積が求められる。

高温ガス炉については、高温ガス炉特有のセラミックス被覆燃料の安全性、空気侵入時における黒鉛酸化挙動、水素製造技術等の研究テーマが挙げられる。

ナトリウム冷却高速炉と高温ガス炉を除いた第4世代炉については、まだ研究段階であり、材料開発、燃料開発など、取り組むべき研究テーマは多方面にわたる。

（5）政策的課題

次世代軽水炉については、縮小化されたプロジェクトを再開できるように人材維持を図るとともに、将来の既設炉のリプレースの可能性に対応できるように安全性向上技術開発を進め、我が国単独ではなく国際協力の活用などを検討することが求められている。

小型炉については、我が国では電力自由化によりコスト競争が厳しい中で小型炉導入のメリットは小さい。僻地立地の可能性については検討の余地がある。

第4世代炉は、2030年以降の実用化を目指している。将来の原子力利用が必ずしも明確ではない状況では、長期的視野にたつて人材維持を図りながら重要な基盤研究を進めることが求められる。ナトリウム冷却高速炉については、国内プロジェクトを再開できるように技術競争力を確保しつつ、開発先進国として積極的に世界貢献を果たすべく海外プロジェクト（ASTRIDなど）への参画により技術基盤を維持していくことが求められている。高温ガス炉については、技術実証に向け現状の研究開発体制を維持し、中国やカザフスタンなどとの国際協調を進めるとともに、水素利用等の産業推進を図ることが求められている。

（6）キーワード

新型炉、次世代軽水炉、第4世代炉、小型炉、ナトリウム冷却高速炉、高温ガス炉、APWR、ABWR、常陽、JSFR、HTTR

（7）国際比較 16, 17)

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 福島第一原子力発電所事故の教訓、知見を踏まえ、炉心溶融を伴うシビアアクシデントの現象解明や解析コード開発などが進められている。経済産業省の自主的安全向上WGにて、軽水炉の技術ロードマップが策定されている。新型原子炉の開発においてもこれらの活動を踏まえて研究が実施されている。 ● 第4世代炉のナトリウム冷却高速炉や鉛ビスマス炉などについては材料・熱流動・核特性に関する研究が進められている。
	応用研究・開発	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> ● 新規制基準の策定を踏まえ、それに適合する安全性を備えた概念が各炉型にて検討されている。 ● 技術的優位だった第4世代炉としてのナトリウム冷却高速炉（JSFR）の開発は縮小化されているが、仏ASTRID協力で技術の維持をしつつ、国際的に調和する安全基準を策定している。 ● 第3世代炉（APWR、ABWR）は建設、輸出の進捗が滞っている。 ● 次世代軽水炉などの新型炉については現状では産業化の議論までには至っていない。
米国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● シビアアクシデント耐性燃料などの新型材料開発、積極的にシミュレーション技術を活用する計算技術開発などの研究が活発である。 ● 大統領の諮問委員会であるブルーリボン委員会での結論に基づき、基礎・基盤研究に特化して着実に研究開発を実施している。 ● 次世代炉の開発においては、民間の投資も重視しており、超高温ガス炉、溶融塩炉についても研究を実施している。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● ナトリウム冷却炉については、Clementine、EBR-I、LAMPRE、EBR-II、Fermi-I（以上は金属燃料）、SEFOR、FFTF（以上は酸化物燃料）と多くの建設・運転経験を蓄積している。 ● ブルーリボン委員会は、2012年に特定の燃料サイクルに現時点で政策として不可逆的に関与することは時期尚早であると結論、むしろ、不確かな将来に直面した際、より効果的に環境変化に適応しよう、放射性廃棄物管理プログラムと幅広い原子力エネルギー・システムのオプションを保持して開発を続けることが重要とした。 ● 技術的な観点、金属燃料によるナトリウム炉、乾式再処理の組み合わせを有望としている。 ● 2000年にGIFを設立した。第4世代炉の概念を追求する目的である。 ● 2006年にグローバル原子力エネルギーパートナーシップ、2009年に国際原子力エネルギー協力枠組をそれぞれ発足させた。 ● 小型モジュール炉の開発が活発である。mPower炉やNuScale炉などの軽水炉改良版に加えて、非軽水炉であるナトリウム炉（PRISM）やガス炉（PBMR）もあげられる。 ● ビルゲイツ氏が出資したテラパワー社によりナトリウム炉（TWR）の開発が進められている。 ● エネルギー省は認可支援のための資金援助を含めて積極的に開発を推進している。 ● 次世代軽水炉AP1000は米国と中国で建設中であり、英国などでも建設計画があり、次世代軽水炉は勢いがある。
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 欧州全体で共同して着実に研究を進めている。 ● MYRRAR炉は、実用化を目指すのではなく、試験研究施設として位置付けられている。欧州内の研究開発としてはナトリウム炉に次ぐ優先度があるとされている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 第4世代炉のナトリウム冷却高速炉ASTRIDの予備的な概念設計段階であり、多額の予算で研究開発を進めている。規制側と調和を図りながら概念設計に進める準備をしている。 ● 第4世代炉のガス冷却高速炉ALLEGROは、欧州戦略投資基金計画の優先投資項目に選定され、研究開発が継続している。 ● 次世代軽水炉EPRはフランスとフィンランドと中国で建設中であり、英国や米国などでも建設計画があり、次世代軽水炉は勢いがある。
フランス	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 欧州全体で共同して着実に研究を進めている。 ● 一時期、ガス冷却高速炉の研究開発を進めていたが、現在はEU予算の中で基礎的な研究開発が進められている。 ● ADSについては技術課題が多いとし、研究開発は実施していない。

				<ul style="list-style-type: none"> ● 小型炉は経済性がよくないこと、国内に市場が無いことから国内向けの開発は実施していない。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 実験炉Rapsodie、原型炉Phenix、実証炉Super Phenicsと多くの実績、運転経験を有している。 ● 2030年頃に第4世代炉のナトリウム冷却高速炉ASTRIDの運転開始を予定している。2040年頃から実用炉を順次導入予定。 ● 高速炉等による長寿命放射性廃棄物の分離・変換を行う計画である。2012年12月にCEAは産業化に関する報告書を提出し、ナトリウム冷却炉が最良の解決策であると評価した。 ● エネルギー大臣は2015年に既設炉のリブレースとして第4世代炉を建設すべきとの声明を出した。
英国 18)	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 欧州全体で共同して着実に研究を進めている。 ● 2014年に小型モジュラー炉に関するフィージビリティスタディを実施している。 ● 「経済とエネルギーの安全保障に資する原子力の研究開発を、産官学が結束して実施する」、「短期的、長期的、商業的に成功するために適切なレベルの原子力革新と研究開発を行う」
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 独自に開発を行うのではなく、海外の技術を導入するという方針で、大型軽水炉、小型モジュラー炉を導入する予定。 ● 将来の実用炉の優先度は第一にナトリウム冷却炉、次に高温ガス炉である。しかし、独自に研究開発は実施していない。第4世代炉の導入は2050年頃とされ、当面の課題としてプルトニウムバーナーが検討されている。 ● エネルギー担当大臣が「英国の繁栄は原子力発電なくしては困難」と宣言し、「英国の原子力の将来」と題する戦略報告書を2013年に発表した。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● Gen-IV研究の一環として、超高温ガス炉、超臨界圧水軽水炉や熔融塩炉の研究も実施している。 ● GIFに関連する活動として、ナトリウム炉とガス炉に関する開発を実施している。
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● ナトリウム冷却高速炉は、PWRに次ぐ最重要炉型と位置づけ、中国原子能科学研究院（CIAE：China Institute of Atomic Energy）により実験炉CEFRが2011年に初送電を達成し、性能試験を実施している。これはロシアの技術協力による。 ● 原型炉は建設せず、ロシアの協力により実証炉の導入による早期実用化を目指す方針である。 ● ガス炉は、自国で知的財産権をもつことを目的とし、清華大学により実験炉HTR-10の知見を踏まえて、2017年の完成を目指し実証炉HTR-PMを建設している。 ● 自主技術で開発するため、（次世代軽水炉ではない）軽水炉CAP1400の設計を推進している。2016年にはIAEAによる安全審査を完了した。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● ガス炉の燃料体であるTRISO燃料を多目的照射炉HANAROで照射実験を行い、基礎研究が進められている。 ● 300MWeのモジュール炉で水素製造するVHTRの検討を行っている。 ● 将来炉の許認可のための基盤研究を実施している。第一段階としてSFRの特性調査、ギャップ分析を行う。第二段階として、SFRの特性調査、評価ガイド案の作成を行うとしている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● ナトリウム冷却高速炉はPGSFRを設計中であり、自然循環試験ループを製作するなどして研究開発を推進している。 ● 米国System80+をベースに自主技術で開発された次世代軽水炉APR1400はUAEに輸出成功しており、他国でも受注競争に参加している状況である。 ● 小型モジュラー炉SMARTは海水淡水化と熱供給が可能な多目的原子炉であり、海外輸出戦略を展開している。
ロシア	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 第4世代炉の鉛冷却高速炉BREST300、鉛ビスマス冷却高速炉SVBR100の建設計画があり、幅広く基盤技術を開発することが目標とされている。小型の熱利用コージェネ炉や浮揚型原子炉の研究開発も実施している。 ● Gen-IV研究の一環として、超臨界圧水軽水炉や熔融塩炉の研究も実施している。 ● 多目的研究用ナトリウム高速炉MBIRを2015年に建設開始、2020年に運転開始予定である。

	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● ナトリウム冷却高速炉は堅実に開発を維持しており、実験炉BOR60、原型炉BN600に次いで、実証炉BN800が2014年に初臨界を達成し、2015年に発電を開始した。 ● 実用炉であるBN1200も開発中であり、安全性についてはGIFで定めた安全設計基準を採用する。連邦特別プログラムで高速炉サイクル技術を最優先に開発することを決定、予算化している。 ● 軽水炉VVERは東欧や中央アジア諸国を中心に輸出しており、燃料供給も合わせて輸出産業と位置づけている。
インド	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 大学や研究所で軽水炉を中心に研究が進められている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● フランスの技術をもとに独自路線でナトリウム冷却高速炉を開発する予定である。 ● FBTR実験炉（ループ型、13MWe）は1985年から運転中。PFBR原型炉（プール型、500MWe）が2015年に完成しており、2017年に臨界予定である。さらに同型の実用炉（600MWe）をツインプラントとして建設する予定である。 ● 当面は酸化物燃料、プルトニウム燃料サイクルとするが将来はトリウム燃料サイクルとする。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁、エネルギー基本計画（2014）
http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf
- 2) The Generation IV International Forum, https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public
- 3) The World Nuclear Association, Advanced Nuclear Power Reactors
<http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Advanced-Nuclear-Power-Reactors/>
- 4) AP1000 PRESSURIZED WATER REACTOR, Westinghouse Electric Company,
<http://www.westinghousenuclear.com/New-Plants/AP1000-PWR>
- 5) ESBWR 開発, 日立 GE ニュークリア・エナジー,
<http://www.hitachi-hgnc.co.jp/activities/innovation/esbwr/>
- 6) 次世代軽水炉等技術開発に係る中間評価について、エネルギー総合工学研究所
http://www.iae.or.jp/report/list/nuclear_energy/nxt_generation_lwr_interim-appraisal/
- 7) 次世代軽水炉等の技術開発に対する見解（原子力委員会）
http://www.iae.or.jp/wp/wp-content/uploads/2014/09/nxt_generation_lwr/lwr20100824_5.pdf
- 8) The World Nuclear Association, Small Nuclear Power Reactors
<http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Small-Nuclear-Power-Reactors/>
- 9) The World Nuclear Association, Generation IV Nuclear Reactors

- <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Generation-IV-Nuclear-Reactors/>
- 10) 文部科学省、もんじゅ研究計画
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/061/houkoku/1344598.htm
 - 11) エネルギー総合工学研究所、高温ガス炉プラント研究会、高温ガス炉の概要
http://www.iae.or.jp/htgr/pdf/00_summary01/00_1.pdf
 - 12) 岡本孝司、高温ガス炉の課題、一般財団法人エネルギー総合工学研究所（2013）
http://www.iae.or.jp/htgr/pdf/02_result/infomation/02result_20130903_04.pdf
 - 13) 文部科学省、群分離・核変換技術評価について(中間的な論点のとりまとめ)（報告書）、科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会 群分離・核変換技術評価作業部会（2013）
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/070/index.htm
 - 14) 日本原子力発電・日本 NUS、平成 24 年度発電用原子炉等利用環境調査（2013/5）
www.meti.go.jp/meti_lib/report/2013fy/E003617.pdf
 - 15) 吉岡律夫・木下幹康、トリウム熔融塩炉の開発の現状について（2013/5/9）
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2013/siryo17/siryo2-2.pdf>
 - 16) 最近の世界の原子力開発動向、日本原子力産業協会 国際部、2015 年 8 月、
https://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/2015/08/recent-world-npp-trend.pdf
 - 17) 第 20 会原子力委員会資料第 3 号、海外における高速炉開発について
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2016/siryo20/siryo3.pdf>
 - 18) The UK's Nuclear Future, HM Crown Government, 2013

3.5 核融合炉

（1）研究開発領域の簡潔な説明

原子炉は、核エネルギーを電力などに変換して取り出すためのシステムである。本章では、その中でも軽い核種同士が融合することにより放出されるエネルギーを取り出す核融合炉を対象とする。主に磁場閉じ込め方式の一種である国際熱核融合実験炉 ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)及びレーザー核融合の研究開発を対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

アジア・アフリカ諸国の経済発展に伴う世界的なエネルギー需要の増大に伴い、化石燃料等の天然資源の枯渇が懸念されている中、再生可能エネルギーの研究開発、利用促進が行われているものの、その利用にも自ら限界がある。一方、地球環境を保全する観点から二酸化炭素の排出制限が検討されており、化石燃料の積極的使用は避けなければならない。このような状況の下、エネルギー資源の乏しい我が国においては、エネルギーの安定供給を図ることも当然であるが、地球規模のエネルギー確保の観点からも新しいエネルギー源を模索することが求められている。核融合エネルギーは、燃料資源の豊富さ、発電に際して温室効果ガスの排出がないこと、原理的に核的暴走がない安心感、放射線被ばく事故の潜在的影響度の低さ、多目的熱源としての利用性等の特長を持つことから、世界規模でのエネルギー供給と温室効果ガス排出抑制の両立を可能にする将来のエネルギーと分析されている¹⁾。このため、核融合に関する学術および技術の進歩をはかり、長期的展望の下で段階的に実用発電に供する核融合炉の技術開発及びその製作技術の確立は我が国のエネルギー戦略上重要である。

[動向（歴史）]

核分裂は重い元素であるウランやプルトニウムを用いるのに対し、核融合は太陽のエネルギー源となる反応であり軽い元素の水素やヘリウムを用いてエネルギーを発生する。地球上で核融合反応を発生させるためには、人工的に数億℃もの超高温環境を作り出さなければならない²⁾。

● 磁場閉じ込め方式核融合

上記核融合反応を起こすための技術の一つとして、高温のプラズマを効率よく閉じ込める技術が長年の開発課題となっていた。プラズマ閉じ込めの研究は、1950年代から当時の科学技術庁、大学等によって開始された。この年代に原子力委員会には核融合専門部会が、日本学術会議には核融合特別委員会が設置されている。1968年、ソ連の考案した「トカマク」と呼ばれる磁場閉じ込め方式による実験成功を機に核融合研究の主流はトカマク方式となり、1990年代には日本のJT-60（量子科学技術研究開発機構、以下量研機構）、米国のTFTR及び欧州のJETに代表される大型トカマク装置で数億℃に及ぶ核融合臨界プラズマ条件が達成される等、トカマクプラズマの高性能化が進展した。

核融合の研究開発は、原子力委員会の策定した段階的アプローチによって進められている³⁾。第二段階核融合研究開発基本計画（昭和50年決定）の目標であったJT-60での臨界プラズマ条件の達成を受けて、原子力委員会は、平成17年に決定した第三段階核融合研

究開発基本計画（第三段階計画）において、自己点火条件の達成及び長時間燃焼の実現並びに次段階（第四段階）の原型炉の開発に必要な炉工学技術の基礎の形成を目標とした。これを達成するため、国際熱核融合実験炉 ITER を第三段階計画の実験炉と位置付けて、現在、フランスのサン・ポール・レ・デュランス市において建設が進められている。ITER は 1988 年に日米欧ソ（露）により開始され、その後、韓国、中国、インドが加わり、大規模な国際プロジェクトとなった。2025 年の完成後、実燃料を使って 50 万キロワットの核融合出力を 300-500 秒間持続させる計画である。建設を通して参加各極が核融合技術開発の経験を積めるよう ITER では物納方式で構成機器が参加各極で分担製作・納入を行い、ITER 国際核エネルギー機構がシステムとして統合し、組み上げる。日本の調達分担は、超伝導コイル、中性粒子ビーム加熱装置、電子サイクロトロン加熱装置、ダイバータ、遠隔保守ロボット等の先端機器であり、ITER 国際核エネルギー機構の設立に関する協定において、国内機関に指定されている量研機構の管理の下、重電メーカー等がこれらの機器の製作を担っている。

日本国内では、トカマク方式に無い特徴を持つ核融合炉の選択肢を拡げる観点から、磁場閉じ込め方式の一種であるヘリカル方式の研究及び慣性閉じ込め方式の一種であるレーザー方式の研究が学術研究に重点を置いて進められている。ヘリカル方式では、大型ヘリカル装置 LHD（核融合科学研究所）の実験が 1998 年から行われている。また、閉じ込め原理の全く異なるレーザー方式では、大阪大学が独自に開発した高出力レーザーによる「高速点火方式」の実験が進められている（後述）。

● レーザー核融合

レーザー核融合の原理については、不幸にして水素爆弾という形ですでに証明されている。しかし、レーザー核融合研究はいかに制御可能な小さなエネルギーで点火燃焼を起こし、発電ができるかどうかを検証するもので、軍事研究とは目的も方法も大きく異なっている。点火燃焼までは主に物理実験、燃焼実証後は主に繰り返し燃焼のための技術開発が中心である。レーザー核融合方式は各部の独立性が高く、設計に自由度があるため発電実証をする実験炉（磁場核融合では原型炉に相当。出力的には 1/10 程度）クラスまでは現存する技術の改良と、現存する材料で建設可能と考えられている。

国内では、燃料容器に重水素、三重水素混合ガスを充填し、レーザー照射を行い、核融合点火に必要な温度まで加熱することに大阪大学で 1983 年に成功し⁴⁾、また、個体密度の 600 倍の圧縮にも 1986 年に成功している⁵⁾。これらの結果は、その後、米国ロチェスター大学のオメガレーザーで再検証され、チャンピオン記録の更新がなされている。これらの成果を元に世界最大のレーザー核融合施設国立点火施設 (National Ignition Facility : NIF) が米国リバモア研究所に建設された(1997-2009)⁶⁾。このレーザーは将来のレーザー核融合発電所の 1 ショット分のエネルギーに近い 1.8MJ のエネルギーを 192 本のレーザービームでターゲットに照射するもので、間接照射の中心点火方式で点火燃焼を目指すものであった。同規模のレーザー核融合研究施設がフランス(LMJ)⁷⁾と中国でも建設中である。

結果的に NIF では 2013 年のプロジェクト終了までに点火に至らなかったが、核融合で生成した α 粒子による自己加熱が発生し、核融合反応が急激に増え、プラズマの持つエネルギーの 3 倍の核融合エネルギーが観測されている。現在、NIF の次の展開に向けた実験を行いつつ、詳細計画が議論されている⁸⁾。また、米国ロチェスター大学では NIF の 1/70

のエネルギーのレーザーで直接照射の中心点火方式が研究され、爆縮されたコアの性能としては NIF の結果に匹敵する結果が得られている。

（3）注目動向

[新たな技術動向]

● 磁場閉じ込め方式核融合

ITER 計画は建設における遅延により完成時期が当初計画の 2020 年から 2025 年に延期された。一方、2007 年より日欧共同事業として進めている「幅広いアプローチ(BA : Broader Approach)」活動の一部として、ITER や原型炉開発を支援するためのサテライトトカマク JT-60SA の建設を量研機構那珂核融合研究所(茨城県那珂市)で進めている(2019 年完成予定)。完成後は、ITER が稼働するまでは世界最大規模の実験装置となり、その機動力を生かして ITER を補完し、また、原型炉に向けて高圧カプラズマの定常運転等の先駆的な運転技術の開発が行われる計画である。

● レーザー核融合

NIF ではターゲット設計の変更、製作技術の向上、レーザーの増力などが引き続き検討されている。フランスやイギリスを中心とした EU では衝撃波点火方式が検討されている。この方式は低温高密度に圧縮した状態でさらに強いレーザーを照射し、発生した向心衝撃波が中心で衝突することにより点火しようとするもので、NIF で問題となった爆縮末期の中心高温部と周辺の主燃料の間の流体力学的不安定性は影響しないとされている。国内では流体力学的不安定性の影響が少ない高速点火方式が大阪大学にて研究されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

● 磁場閉じ込め方式核融合

核融合発電に向けた技術基盤構築を国が設置する原型炉開発総合戦略タスクフォースと連携して推進するため、原型炉設計合同特別チームが 2016 年に設置された。このチームは、産学官連携の下で原型炉の概念設計活動と関連する研究開発を推進するオールジャパン体制の組織であり、2027 年頃までに原型炉概念設計を完了する計画である。

原型炉またはその前段階となる試験装置の設計は、ITER と並行して世界各国で進められている。欧州は、日本とほぼ同じスケジュールで原型炉開発を進めており、原型炉の概念設計と要素技術の研究開発が行われている。中国は、原型炉に向けた炉内機器の工学試験のため、ITER と同様に核燃焼を行う工学試験炉 CFETR(Chinese Fusion Engineering Test Reactor)を計画中で、既に概念設計を終えて詳細設計を進めている段階であり、2020 年には建設判断、2030 年に建設完了のスケジュールとなっている。韓国では、原型炉に向けた技術開発に先んじて原型炉 K-DEMO の設計が開始されている。

原型炉に向けた炉工学技術の開発プロジェクトとして、ブランケット施設による燃料増殖試験のプロジェクト、並びに強力な核融合中性子源による炉材料試験の計画が量研機構にて検討されている。この核融合中性子源は完成すれば世界最大規模となり、日本原子力研究開発機構と高エネルギー加速器研究機構が共同で建設した大強度陽子加速器施設の数倍を超える中性子照射環境を提供することが可能となり、その応用は核融合炉材料の研究

開発にとどまらず、他の工業応用やラジオアイソトープの生産など医療応用への波及効果も期待される。

実験等で得られる現象を再現し、そのメカニズムを理解したり、別の条件での予測を可能にする理論シミュレーション研究も進められている。特に、プラズマの研究では ITER や JT-60SA 等の限定的な実験データを活用して第一原理解析（プラズマを構成する荷電粒子について、外部の電磁力及び相互のクーロン力による運動を追跡する解析手法）または十分検証を行った解析モデルに基づくシミュレーションコードを構築することが重要であり、十分検証されたコードを利用すれば将来の核融合炉の性能や特性を予測することが可能になる。量研機構六ヶ所核融合研究所（青森県六ヶ所村）では、現在、核融合専用のスーパーコンピュータ（LINPACK 性能 1.23 ペタフロップス）が稼働中であり、燃焼プラズマのふるまい、核融合炉材料の損傷、核融合原型炉の設計解析などに有効に活用されている。スーパーコンピュータを利用したソフトウェア開発やシミュレーションは、核融合開発において重要なトレンドになると考えられる。

- レーザー核融合

国内では大阪大学において高速点火方式による爆縮プラズマを、点火に必要な 5keV まですに加熱することを目標とした改良が加えられている。具体的には、点火レーザービーム、加熱物理プロセスの改良等である。最新のシミュレーションでは 4keV 以上に加熱できる結果が出ているが、爆縮プラズマが高密度になっているときに追加加熱レーザーを照射しなければならず、タイミング制御が限られたショット数の間に習熟できるかが課題となっている。

国外では現在建設中で最も進んでいるのはフランスの LMJ である。当初の計画では NIF とほとんど同じ間接照射の中心点火方式であったが、NIF の結果を受け、どのような展開になるか注目に値する。

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

- 磁場閉じ込め方式核融合

核融合炉については、発電実証へ向けて必要となる技術課題が整理されている^{9,10)}。そのうち、ボトルネックとなる課題は炉内に設置されるダイバータという受熱を担う機器であり、その技術的制約が核融合炉の出力規模の決定要因になっている。ダイバータは原型炉で想定される運転条件と現在の科学的理解と技術成熟度の乖離が大きい。この課題の解決のためには、JT-60SA 等を用いた実機試験、ITER の運転で蓄積される経験知、小型装置による基礎研究、数値モデルの高度化と実験検証、革新概念の原理検証と性能向上という幅広い切り口からアプローチして問題解決を図ることが求められる。

- レーザー核融合

直接照射でも間接照射方式でも爆縮末期の点火部と主燃料の境界に発生する流体力学的不安定性（燃料のミキシングとも言う）はほとんど制御することはできない。ミキシングの影響がない程度に爆縮コアを大きくするか、不安定性が成長し始める種をいかに小さく許容できるレベルに押さえるかが課題である。

高速点火方式では追加熱レーザーでどこまで加熱できるかが課題である。一般に電子温度が高くなると、加熱効率が下がるため、波長 $1.06\mu\text{m}$ のレーザーを用いた電子加熱だけでは困難ではないかと考えられている。

衝撃波点火方式は未だ本格的な実験はなく、爆縮末期にレーザーが到達するカットオフ面は流体力学的不安定性で凸凹になっていると考えるのが現実的であり、そのような状態で十分な向心衝撃波を作ることができるかどうか、レーザー強度が $1014\text{W}/\text{cm}^2$ より高くなると、パラメトリック不安定性などで高速電子が発生し、シャープな衝撃波を立てることができなくなるのではないかなどが最大の課題である。衝撃波点火方式で単ショットベースの点火に成功しても、光学系の損傷閾値が下がることからレーザーポートの穴を大きくする必要があり（通常を中心点火方式では炉の中心から見て全立体角の5%以下）、現実的な商用炉が設計できるか、引き続きの検討が求められる。

[今後取り組むべき研究テーマ]

● 磁場閉じ込め方式核融合

ITER 建設のための技術的問題はほぼ解決されており、プラズマ制御を中心とした運転技術の確立が重要な研究課題である。ITER だけでなく、サテライト装置となる JT-60SA での実験研究と理論シミュレーション研究を連携して実施することが効果的である。ITER の次段階となる原型炉では、厳しい中性子照射に耐える材料及び炉内機器の規格基準の確立が求められる。材料の中性子照射特性データは試験片の原子炉内照射によりデータ蓄積が進んでいるが、核融合炉特有の高エネルギー中性子に対するデータが不足している。原型炉開発の技術基盤確立のため核融合中性子源の開発とそれによる材料照射試験が求められている。

● レーザー核融合

中心点火方式では爆縮全体を通じた流体力学的不安定性の抑制が重要であり、ターゲット製作、供給方式、レーザービーム間のパラメトリック効果によるエネルギー移動について、さらなる研究開発が求められる。

高速点火方式では外部磁場による高速電子のガイド、イオン加熱の併用、などの検討の余地は十分ある。また、追加熱レーザー波長を $0.53\mu\text{m}$ に変換すると（技術的には十分可能）、電子加熱だけでも点火温度に達することができる可能性があり、近年中に実験的に検証される。

(5) 政策的課題

核融合装置は大規模プロジェクトであるがゆえに設計から建設完了まで 10-20 年程度を要し、その運転による技術開発にはさらなる年月を要することになる。したがって、先行プロジェクトで蓄積した技術を次期プロジェクトに継承すると共に、経験のある人材を次期計画に有効に活用することが重要である。政策的課題としては、これらのプロジェクト間の繋がりを考慮した開発戦略を練り、技術の断絶や人材の谷間ができないよう研究開発基盤体制を構築することが求められる。

磁場閉じ込め型核融合においては、ITER が国際共同事業として進められている状況を

鑑みると、今後は材料、製作・検査法、安全性などに関して国際標準化が進むと考えられ、関連する国際協力を戦略的に取り組むことが求められる。

レーザー核融合においては、原型炉を目指す磁場閉じ込め方式に比べ、レーザー核融合は未だ原理検証の段階である。そのため、レーザー核融合の研究は、高エネルギー密度科学の一環として研究が進められている。国際連携も視野に入れた高速点火方式での点火燃焼を狙う計画が日、米、英の間で検討されており、高エネルギー密度科学に関する共同研究を円滑に進めるには、ショット数確保に関するバックアップが求められる。

（6）キーワード

ITER、幅広いアプローチ活動（BA 活動）、JT-60SA、原型炉、レーザー核融合、燃焼、中心点火、高速点火、衝撃波点火、高エネルギー密度科学

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 量研機構六ヶ所核融合研究所で展開しているBA活動により、ITERの次段階となる原型炉へ向けた研究開発、シミュレーション研究が進展している。研究規模や範囲は限定的。 ● 文科省の核融合科学技術委員会下に原型炉開発総合戦略タスクフォースを組織し、原型炉開発へ向けたアクションプランを策定。 ● レーザー核融合では、大阪大学において爆縮プラズマの点火温度5keVまでの加熱を目標に高速点火原理検証プロジェクトFIREX Iが進められている。要素研究はほぼ終了し、近日中に統合実験が行われる。 ● 光産業創成大学院大学/浜松ホトニクスでは繰り返しレーザーを用いた核融合の物理実験が行われている。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● ITERの建設のため、高度な技術を要する機器調達を担っており、産業界の技術蓄積、人材育成が着実に行われている。 ● BA活動によりサテライトトカマクJT-60SAを量研機構那珂核融合研究所に建設中。 ● 大阪大学では全国共同利用施設として、大型レーザーを用いた高エネルギー密度科学の研究が進められている。さらに、実験室宇宙物理、超高压状態を再現できることから惑星物理の実験、フォームデンスマターの実験的研究が進められている。 ● レーザー核融合炉用のレーザー開発ではさらに繰り返しを上げたレーザーの開発が進められ、産業用加工レーザーとして有望な低温冷却Yb:YAGセラミックレーザーの研究が進められている。
米国	基礎研究	○	↘	<ul style="list-style-type: none"> ● 磁場閉じ込め型では、プラズマ物理、核融合炉材料、安全性などの研究で最先端にあるが、基礎研究の計画及び人的資源の面で下降傾向にある。 ● リバモア研究所のNIFプロジェクトに関する実験結果詳細な解析が2015年9月に開催された国際会議IFSAで発表された。次の展開を図るための補足実験と、開発研究が進められている。 ● ロチェスター大学ではオメガレーザー¹⁾、OMEGA-EPなどを用いて直接照射による中心点火、高速点火の核融合実験が行われている。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● ITER初期から中心的な役割を果たしてきているが、エネルギー省は核融合をエネルギー研究でなく「科学研究」と位置付けており、核融合実現へ向けた開発計画が停滞傾向。 ● リバモア研究所では世界最大のレーザーを有効に利用するため、共同利用施設としての運営が始められた。また、日本との共同研究にも積極的である。
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 今世紀中葉に核融合エネルギーを実現するためのロードマップを策定し、欧州内の協力体制EUROfusionの下で、各研究所の研究を組織化し、研究開発を展開。

				<ul style="list-style-type: none"> ● フランス原子力庁のLMJの建設が進められているものの、ITER計画との兼ね合いで、建設経費の確保に苦慮している様子である。また、イギリスにおいてはオライオン（5kJ、10ビーム）を用いて、核融合の基礎研究と関連する物理実験が行われている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● ITERのホスト極として、ITER建設のために相当規模の資源を投入してITERの建設を推進している。 ● 2014年からLMJの完成した一部のビームを使用する共同研究が公募され、1年の準備期間をおいて実施され始めている。
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 核融合への参入が比較的遅かったため基礎研究の拡がりは限定的であるが、豊富な人的資源を活かして躍進が見られる。 ● レーザー核融合においては、上海光機所では神光I upgradeが完成し、稼働中である。また、綿陽のレーザー核融合研究所では神光III号が稼働中で、間接照射による核融合の基礎研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● ITERの調達や国産超伝導トカマクEASTの建設・運転を通して技術力が向上。 ● 国内計画として、ITERの次段階に相当する核融合工学試験炉CFETRの建設を中国政府に提案中であり、その設計及び機器の開発が進行中。 ● レーザー核融合においては、上海光機所にて高エネルギー密度科学の研究が行われている。ここから綿陽にもレーザー部品を供給している。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 核融合への参入が比較的遅かったため基礎研究の拡がりは限定的。 ● KAISTではターゲット照射技術に関する基礎研究が行われている。KAERIでは1kJ/4beamレーザーで爆縮実験が行われている¹²⁾。ただ、韓国でも磁場核融合が主流になっている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● ITERの調達や超伝導トカマクK-STARの運転を通して技術力が向上。 ● ITER以降の研究開発については独自開発というよりも国際協力に重点を置く傾向にあり、新しい枠組みを模索中。 ● 2011年にPohangのHandong Global UniversityにGlobal Institute of Laser Technology (GILT)が設立され、米国リバモア研究所と研究協力協定が結ばれ、LIFEベースのレーザー核融合プラント設計研究がスタートした。しかし、NIFの終了以降の動向は明らかではない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) 「核融合エネルギーの技術的実現性、計画の拡がりと裾野としての基礎研究に関する報告書」、原子力委員会核融合会議開発戦略検討分科会（平成12年5月）。
- 2) 原子力学会、よくわかる核融合炉のしくみ
<http://WWW.aesj.or.jp/~fusiolvaesjfont/rensai.htm>
- 3) 今後の核融合研究開発の推進方策について、原子力委員会核融合専門部会（平成17年10月）。
- 4) C. Yamanaka, S. Nakai, T. Yabe, H. Nishimura, S. Uchida, Y. Izawa, T. Norimatsu, N. Miyayana, H. Azechi, M. Nakai, H. Takabe, J. Jitsuno, K. Mima, M. Nakatsuka, T. Sasaki, M. Yamanaka, Y. Kato, T. Mochizuki, Y. Kitagawa, T. Yamanaka, K. Yoshida, "Laser implosion of high-aspect-ratio targets produces thermonuclear neutron yields exceeding 10¹² by use of shock multiplexing" Phys. Rev. Lett., 56, 1575-1578

- 5) S. Nakai, K. Mima, T. Yamanaka, Y. Izawa, Y. Kato, K. Nishihara, T. Sasaki, M. Nakatsuka, M. Yamanaka, H. Azechi, T. Jitsuno, T. Norimatsu, K.A. Tanaka, N. Miyanaga, M. Nakai, M. Takagi, Y.W. Chen, H. Katayama, M. Katayama, R. Kodama, H. Nakaishi, Y. Setsuhara, A. Nishiguchi, T. Kanabe, C. Yamanaka,
13th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Washington, DC, USA, 1-6 Oct. 1990 [IAEA-CN-53/B-1-3]
- 6) Lawrence Livermore National Laboratory
<https://lasers.llnl.gov/news>
- 7) The Megajoule Laser facility
<http://www-lmj.cea.fr/index-en.htm>
- 8) E. I. Moses, J. D. Lindl, M. L. Spaeth, R. W. Patterson, R. H. Sawicki, L. J. Atherton, P. A. Baisden, L. J. Lagin, D. W. Larson, B. J. MacGowan, G. H. Miller, D. C. Rardin, V. S. Roberts, B. M. Van Wonterghem, P. J. Wegner
Overview: Development of the National Ignition Facility and the Transition to a User Facility for the Ignition Campaign and High Energy Density Scientific Research, Fusion Science and Technology / Volume 69 / Number 1 / January 2016 / Pages 1-24
- 9) 核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム報告（平成26年7月）.
- 10) 核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム報告 -原型炉技術基盤構築チャート-（平成27年1月）.
- 11) The Laboratory for Laser Energetics
<http://www.lle.rochester.edu/>
- 12) The Korea Atomic Energy Research Institute
http://www.kaeri.re.kr:8080/english/sub/sub03_03_01_01.jsp

3.6 原子力安全

（１）研究開発領域の簡潔な説明

原子力施設の安全確保のための様々なリスク評価の手法確立やシビアアクシデントへの対応、また、緊急事態時における公衆、作業員、インフラ、環境等への影響を低減するための技術基盤に関する研究開発領域である。

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

福島第一原子力発電所事故で顕在化したように、原子力施設でひとたび重大な事故が発生すると、その影響は空間的・時間的に非常に広い範囲に及び、甚大なものとなりうる¹⁾²⁾。そのため、原子力施設の安全性を確保することは、社会的に重要なミッションであるといえる。安全を達成することは、ゼロリスクを実現することであると捉えられることもあるが、科学技術分野においてゼロリスクは現実的に達成不可能であることから、ゼロリスクを目指しつつ、社会通念上、許容されるレベルまで原子力施設のリスクを抑制する取り組みを行う必要がある³⁾。なお、社会通念上、許容されるレベルの安全性を達成したとしても、ゼロリスクを目指して、新しい知見取り込みつつ継続的に安全性を高めていく取り組み（継続的改善）が重要とされている。

[動向（歴史）]

原子力の安全性は、主要な原子力事故を節目に研究や取り組みのあり方が変化してきたといえる。

1979年に米国ペンシルベニア州において発生したスリーマイルアイランド原子力発電所2号機事故⁴⁾は、加圧逃し弁の開固着による小規模冷却材喪失事故（小LOCA）、誤認しやすい原子炉水位の表示、運転員の適切でない対応操作などが重なり、原子炉水位の低下から炉心の大部分が熔融に至ったものである。なお、炉心は大規模に損傷したものの、原子炉圧力容器は健全であり、周囲への放射性物質の放出は限定的であり、長期間の避難などの事態には至らなかった。この事故は、マンマシンインターフェースの重要性、ヒューマンエラーの防止などに関する取り組みを促進するとともに、軽水炉でもシビアアクシデントが起り得るとの認識のもと、シビアアクシデント対策の充実のきっかけになった。また、本事故発生前から実施されていた確率論的リスク評価により、小LOCAによる炉心損傷確率が比較的高いことが示されていたことから、確率論的リスク評価の有用性が再認識され、安全性向上に利用する動きが広まった。

1986年に旧ソ連で発生したチェルノブイリ原子力発電所4号機事故⁴⁾は、低出力での自己制御性の低さ、いくつかの運転規則の違反などが重なり、急激な過出力が発生、原子炉および建屋が爆発的に破壊されたものであった。また、その後発生した黒鉛による火災により、大量の放射性物質が広い範囲にわたって飛散した。この事故では、原子炉が有する固有の安全性の重要さが再認識されるとともに、運転規則の度重なる違反が発生した組織のあり方（安全文化）の重要性が注目され、特に安全文化を醸成する取り組みのきっかけとなった。また、欧州では、本事故に起因するセシウムが広範囲に検出され、脱原発の動きが広がりを見せる

など社会的に大きな影響を受けるとともに、軽水炉における過酷事故対策の取り組みをさらに加速させる要因となった。例えば、欧州において、過酷事故時に格納容器内の圧力を下げするために使用されるフィルタードベントは、本事故の後に導入が進んだ。

2011年に発生した福島第一原子力発電所事故^{1-2),4)}では、地震に起因する巨大な津波により炉心冷却などの安全機能が広範囲に一斉喪失、結果として当時出力運転中であった1-3号機が大規模な炉心損傷に至った。溶融した燃料(の一部)は、圧力容器を貫通し、格納容器内まで広がっているものと推定されている。この事故を受けて、原子力基本法、原子炉等規制法などが改正され、原子力規制委員会が新たに発足するとともに、動力炉、核燃料サイクル施設、研究炉などに対して新たに規制基準が策定された。新たに策定された規制基準においては、潜在的なリスクが大きい施設に対し、従来は事業者の自主的措置として導入がなされていた過酷事故対策が義務付けられるとともに、設計基準事象として種々の外的事象に対する対策が新たに求められるようになった。

また、欧州では、2004年より19ヶ国が参加する過酷事故研究ネットワーク（SARNET）をEU内に設立して、過酷事故に関する共同研究、研究成果のデータベース化、教育・人事交流などを実施している⁵⁾。SARNETでは、過酷事故における優先課題を、(1)原子炉における溶融炉心冷却、(2)溶融炉心コンクリート反応（MCCI）時における溶融炉心冷却、(3)圧力容器外水蒸気爆発、(4)格納容器内の水素混合・燃焼、(5)ソースタームに及ぼす高燃焼度燃料及びMOX燃料の酸化の影響、(6)原子炉冷却系及び格納容器内におけるヨウ素化学の6項目に絞って研究開発を重点的に進めている⁶⁻⁷⁾。

（3）注目動向

[新たな技術動向]

設計基準事象を大きく逸脱する過酷事故については、事象および事故シーケンスが複雑であること、実験データが得にくいこと等の理由から、予測計算の不確かさが大きい。そのため、過酷事故進展解析においては、機構論的なモデル開発、部分的な実験データの取得などの研究が進められており、これらの成果が過酷事故進展解析コードに組み込まれつつある⁸⁾。

また、新規規制基準においては、決定論的な手法のみならず、確率論的リスク評価により、プラントの弱点を見つけ出し、過酷事故対策を行うことを求めている⁹⁾。そのため、確率論的リスク評価に関する研究が精力的に進められている。従来、炉心損傷までの確率論的リスク評価（レベル1）が主として行われてきたが、格納容器破損及び放射性物質の放出（レベル2）、周囲への健康被害（レベル3）についても取り組みがなされつつある。また、従来あまり対象とされなかった燃料プールや、多数基立地の特徴を取り扱うリスク評価も行われつつある¹⁰⁾。

さらに、過酷事故発生時の対応策（アクシデントマネジメント）に関する検討が進み、対応するための設備（ハードウェア）および体制（ソフトウェア）の整備が進んでいる。また、過酷事故時のプラントの状況（高温・高圧・高線量）におけるプラント監視のための計装系について、開発が進んでいる¹¹⁾。これらの対応は、新規規制基準への適合性確保と、自主的な安全性向上の取り組みとして実施されている。

解析コードの開発では、水蒸気爆発、MCCI、水素混合・燃焼、FP挙動など個々の単一現

象の解析に特化した専用解析コードが開発され、実験結果に基づき検証が進められた。また、シビアアクシデント時のプラント全体の挙動を解析するため、現象論モデルを統合することによる総合解析コードが開発された。米国規制委員会は MELCOR、米国産業界は MAAP、欧州では ASTEC などのコードが開発され、我が国では JAEA の THALES などのコードが開発されている。個々の事故シナリオにおける事故進展の時間的スケール、格納容器破損モード、ソースタームの評価に利用され、福島第一原子力発電所事故の解析でも利用されている。さらに、物理現象を精緻に表現した多次元の数式・理論式で構築した機構論的モデルを用いて詳細な解析を実施するための詳細解析コードが開発されている。米国規制委員会は SCDAP/RELAP5、米 ISS は RELAP/SCDAPSIM、仏 IRSN は ICARE/CATHARE、独 GRS は ATHLET-CD などのコードが開発され、我が国では経済産業省の支援によりエネルギー総合研究所において SAMPSON コードが開発されている。

なお、原子力災害対策指針が改定され、放射性物質の拡散予測に基づかずに緊急時モニタリングの結果により防災のための行動を起こすこととされた¹²⁾。一方、原子力発電所の立地地域からは放射性物質の拡散予測を防災に活用したいとの声も上がっている¹³⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

過酷事故進展解析においては、解析モデルの開発・改良の観点から、日本原子力学会「シビアアクシデント評価」研究専門委員会が 2011 年 10 月より PIRT (Phenomena Identification and Ranking Table) 手法に基づく研究課題の抽出を進めている¹⁴⁾。この一環として、総合解析コード SAMPSON の開発が経済産業省の支援の下、エネルギー総合研究所を中心として産官学の参画により進められている。また、粒子法 (MPS 法) を用いた機構論的な原子炉下部ヘッド損傷過程の解明などの取り組みがなされている¹⁵⁾。また、過酷事故時における格納容器内の環境 (高温・高圧・高放射線・高湿度) にも耐えうる各種の計装系の開発が、経産省による発電用原子炉の安全対策高度化事業等として実施されている¹¹⁾。

さらに、原子力規制委員会の予算により、JAEA では格納容器内の熱流動、特に、格納容器加圧破損、水素リスク及び FP 挙動に関連した ROSA-SA (Rig of Safety Assessment-Severe Accident) プロジェクトを開始した。本プロジェクトの中心となる新しい大型の格納容器試験装置は、CIGMA (Containment InteGral Measurement Apparatus) と呼ばれ、欧州にある類似の大型試験装置に比べて、特に高温までの実験が可能であるとともに、CFD コードの検証にも役立てるため、詳細な計測が施されていることに特徴がある¹⁶⁾。また、JAEA における解析コードの開発では、PRA 用の高速シビアアクシデント解析コード THLES2 と格納容器内の水相内のヨウ素反応速度論解析コード KICHE を結合した総合解析コード THALES2/KICHE を用いて、福島第一原子力発電所事故の解析等によりソースタームに関する技術的知見を取得することとしている¹⁷⁾。

国際研究協力プロジェクトでは、OECD/NEA の主催により、福島原子力発電所の事故炉の廃止に向けた燃料デブリの取り出しの準備として、シビアアクシデント解析コードの改良、および事故進展と現在の炉心状況の解析のための共同研究計画 (BSAF 計画: Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Project) が進められている。本計画には、フランス、ドイツ、日本、韓国、ロシア、スペイン、スイス、米国の 8 ヶ国が参加し、JAEA をホスト機関として、国内関連研究機関、産業界の協力により、

2012年～2015年まで、各国で利用可能な総合解析コードを用いた解析が実施された¹⁸⁾。また、引き続き2015年～2018年のPhase 2では、加、中、フィンランドの3ヶ国が加わり、格納容器外での核分裂生成物の挙動評価、事故後最大3週間程度までのプラントの状態評価を目的とした解析が、エネルギー工学研究所（IAE）をホスト機関として実施されつつある。

2013年2月より、既設軽水炉の安全対策の高度化を図るため、実施すべき原子力安全研究の網羅性や緊急度・重要度を明確化し、重畳を排して効率的な開発を進めていく観点から、総合資源エネルギー調査会・原子力小委員会のもと、自主的安全性向上・技術・人材ワーキンググループが設置された。日本原子力学会「安全対策高度化技術検討」特別専門委員会との連携のもとで、2015年6月に「軽水炉安全技術・人材ロードマップ」が報告されている。このロードマップにおいては、今後重点的に開発を進めていくべき分野が検討されている¹⁹⁾。なお、本ロードマップは、定期的に更新（ローリング）が実施される予定である。

（4）科学技術的課題¹⁵⁾

[課題（ボトルネック）]

● 過酷事故進展解析・過酷事故対応

過酷事故現象は、溶融炉心と冷却材の相互作用、溶融炉心とコンクリートの反応、水蒸気ないし水素雰囲気中でのFPエアロゾルの挙動や水素の格納容器内での挙動など、複雑な物理現象を伴いながら進展する。これらの物理現象は、実験そのものが行いにくいことから、解析モデル検証のためのデータが得にくい傾向にある。また、一般に多成分・多相流が関与するとともに、高温・非平衡など現象として複雑な系の熱流体力学、物理、化学の混合課題であることから、多分野にまたがる連成解析が必要となる。さらに、こうした複雑な現象を解明するためには、異なる分野の多くの専門家の連携も必要となる。

廃止措置の過程で、福島第一原子力発電所事故における炉心・原子炉容器・格納容器の損傷箇所や損傷程度などについて、重要な知見が得られることが期待されるが、高線量下の作業のため、この調査は相当長期にわたると予想されている。

● リスク評価

外的事象に対するリスク評価は、様々なハザード評価手法を用いた取り組みがなされているが、不確かさの扱いなどまだ確立されていない課題がある。さらに、最新知見の取り込みを継続的に行うことは、福島第一原子力発電所事故の重要な教訓であるが、どのように意思決定を行うべきか、議論がなされている。また、複数基立地のサイトに対するプラント間の相互作用を考慮した確率論的リスク解析については、取り組みが進められているが、実用段階には至っていない。

● 安全余裕の拡大と定量化

新型被覆管、高精度シミュレーション手法などの採用により、安全余裕を拡大させる必要があるものの、これらの導入に必要な解析コードの認証の手続きが確立されていない。また、従来設計余裕として見込まれてきた安全余裕の内訳の定量化を進めることが望まれる。

● シミュレーション手法の高度化

安全対策高度化に用いる高精度シミュレーション計算については、着実に研究が進めら

れているが、特に大規模な実現象に関する検証(Verification & Validation)をどのように行っていくのか、検討が必要である。地震・津波については、大規模シミュレーションの活用が進みつつあるが、他の外的事象についての取り組みも望まれる。

- 原子力防災

原子力防災は、深層防護の第5層に位置づけられるが、第4層に相当するアクシデントマネジメントとの連携を強化することが求められる。

[今後取り組むべき研究テーマ]

今後取り組むべき個々の研究テーマについては、上述の日本原子力学会による「熱水力安全評価基盤技術高度化戦略マップ 2015（改訂版）」にもその詳細が示されているが、下記に幾つか具体的なテーマについて記載する。

- 過酷事故進展解析・過酷事故対応

個々の物理現象に対して実験などによる検証データの取得を進めるとともに、機構論的な解析モデルの開発を進めることが望まれる。また、過酷事故発生時の効果的な意思決定方法などについての検討が求められる。

- リスク評価

リスク評価に関する研究テーマとして、包絡的外的ハザード評価手法の開発、ハザードカーブの設定、標準の策定、複数ハザード・マルチユニット・マルチサイトに対するリスク評価、リスク評価手法の高度化、新知見取り込み時の意思決定方法の確立等が挙げられる。

- 安全余裕の拡大と定量化

新型被覆管の導入、最新の解析手法の導入などがテーマとして挙げられる。また、これと併せて、新しい解析コードや評価手法の認証方法を確立が求められる。

- シミュレーション手法の高度化

様々な外的事象に対するシミュレーション手法の開発が挙げられる。

- 原子力防災

オンサイト・オフサイトの連携技術の開発が挙げられる。

(5) 政策的課題¹⁵⁾

- 安全目標の設定

原子力の利用に関し、「社会に受容されるリスクレベル」に関するコンセンサスを作る一つの方策が、安全目標の設定である。旧原子力安全委員会が安全目標に関する中間とりまとめをした後、安全目標そのものに関する議論は進んでいない。

- リスク情報の活用

リスク情報に基づいた規制のあり方の改善に取り組む。

- 検査制度

2015年に実施された IRRS により、複雑な検査制度について、リスク情報の活用なども含めて、より効果的なものとなるよう、改善することが求められており、規制委員会にて検討が進められている。

- 過酷事故進展解析・過酷事故対応

福島第一原子力発電所事故前までの大幅な予算縮減により、過酷事故に関する研究規模が縮小された結果、90年代まではある程度存在した専門家がほとんどいなくなっており、研究基盤が失われていることが大きな課題である。福島第一原子力発電所事故を踏まえ、シビアアクシデント研究を中心とする安全研究基盤の充実強化が図られつつあるが、継続してこの取り組みを行うことが求められている。産学官の連携と適切な役割分担により、国際協力も視野に入れて、この分野の研究開発を効果的・効率的に進めつつ、若手の研究者の参画を得て専門家を中長期的に育成することが重要である。

● 原子力防災

現在、緊急時対応については、原子力規制委員会は放射性物質の拡散予測を用いず、緊急時モニタリングの結果により実施するとしている。一方、立地地域からは、緊急時対応の際放射性物質の拡散予測を参考にしたいとの声があり、このニーズをどのように取り込み、対応していくかが課題である。

● 原子力人材

福島第一原子力発電所事故の後、原子力分野を指向する学生数が減っており、将来にわたる人材供給に懸念が生じている。どのように安全を確保する人材を確保していくかが課題である。

(6) キーワード

外的事象、低頻度・高影響事象、リスクマネジメント、信頼性重視保全、PRA、シビアアクシデント、過酷事故、炉心損傷、熔融炉心、水蒸気爆発、熔融炉心コンクリート反応(MCCI)、格納容器直接加熱(DCH)、水素爆発、核分裂生成物(FP)、ソースターム、エアロゾル除去、ヨウ素化学、総合解析コード、詳細解析コード、緊急時マネジメント、緊急時対応計画、レベル3PRA

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 福島第一原子力発電所事故の教訓として、確率論的リスク評価の活用を含むリスク評価の重要性が再認識されている。標準の策定、リスク評価手法の高度化などさまざまな取り組みが精力的になされている。 ● 一方で、福島第一原子力発電所事故以前の取り組みは低調であったことから、米国などに比べると遅れがある。 ● 津波PRAなど外部事象に絡んだリスク評価や高経年評価に関する取り組みが進められている。 ● 防災に関しては、福島第一原子力発電所事故を契機に、新たな個人モニタリング機器の開発、無人航空機モニタリングの開発、除染技術、農作物対策技術、放射性物質の環境移行挙動、線量再構築モデルの開発など、さまざまな分野での基礎研究が進められている。 ● 過酷事故に関しても、筑波大学、早稲田大学、東京大学、京都大学、JAEAなどで基礎的な研究を実施している。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 発電用原子力プラントやそのほかの原子力施設における重大事故評価の際、確率論的リスク評価によって事故進展シナリオの特定が行われ、この事故シナリオに対して安全性評価が求められるなど、規制への導入が進んでいる。ただし、取り組みは緒に就いたばかりである。 ● 海外での輸出を考慮し、PRAなどの充実が図られているものの、まだ机

				<p>上検討にとどまっているPRAも多く、今後、現場の状況を反映した実践的な取り組みが求められる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 原子力災害対策指針に基づいて実効的な地域防災計画策定のためにリスク情報を活用した防護措置戦略のガイダンスなどの研究が進められている。 ● 地域防災計画策定に有用な避難時間推定などのシミュレーションモデルの応用などが開始されている。 ● 福島第一原子力発電所事故後にJAEAでは応用を目指した新たなプロジェクトを開始している。エネ総研では、総合解析コードSAMPSONの開発を実施している。東京電力では格納容器フィルターベント、東芝ではコアキャッチャーなどの開発を進めている。 ● 原子力安全早退としての取り組みを進めるため、経産省/日本原子力学会により自主的安全性向上・人材育成ロードマップが作成され、ローリングが行われる予定である。 ● 日立、東芝、三菱等の産業界では、主として国プロジェクトのもとでシビアアクシデント対策機器の開発を進めている。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 1970年代から確率論的リスク評価に対する取り組みがなされ、広い範囲で基礎研究が行われている。外的事象に対する包絡的なリスク評価も1990年代に実施されている。 ● PRAについて、レベル2やレベル3の見直しを含め検討が進んでいる。 ● 緊急事態への防護目標を達成するための基本的な技術基盤はすでに整備されているとあってよく、防災訓練・演習手法の改良、リスクコミュニケーション分野などで基礎的研究は継続している。 ● 過酷事故に関しては、Perdue大学、Wisconsin大学などで基礎的な研究を実施している。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 1979年のスリーマイル島2号機事故を契機として、本格的にリスク情報を活用した規制が行われている。すべての規制上の意思決定において、確率論的リスク評価を活用する方針がとられている。 ● また、高度なPRAの開発が進められ、リスク評価の活用が進んでいる。 ● NRCの「防護措置戦略のガイダンス」の改定において、PRA手法による防護措置効果が検討された。 ● スリーマイル島原子力発電所事故以後、法的枠組み、事業者・地方政府・国の緊急時対応計画、技術支援システム、評価・監査システムなど、防災システムの整備がもっとも進んでいる。9.11以降はテロ起因の防災訓練・演習を充実させている。福島第一原子力発電所事故の教訓の反映のステップも開始されている³⁴⁾。 ● 過酷事故に関しては、サンディア国立研究所で総合解析コードMELCOR、ISS社でRELAP/SCDAPSIMの開発を進めている。 ● Westinghouseなどで静的水素処理設備(PAR)などが産業化されている。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 原子力発電所を多数有するフランスでは、1990年代初頭から確率論的リスク評価が実施されている。 ● 高経年化評価に対する検討が進んでおり、リスク評価の導入に積極的な国が多い。 ● 防災に関しては、NERISプラットフォームを中心に、さまざまなプロジェクト支援、共同研究が進められている。 ● 過酷事故に関しては、フランスの放射線防護・原子力安全研究所、スウェーデン王立工科大学などを中心としたSARNETの枠で基礎的な研究を実施している。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 2012年に、従来の安全評価（決定論的手法に基づく）を補完するものとして、規制において確率論的リスク評価を導入することをフランスが決定。 ● 英国では、1980年代にサイズウエルB原子力発電所（加圧水型軽水炉）導入の際にレベル1～3の確率論的リスク評価が実施されている。 ● フィンランドでは、1980年代に設定された規制指針において、新設炉に対して設計時に考慮すべき確率論的デザイン目標が示されている。 ● 欧州においては西欧原子力規制者協会（WENRA：Western European Nuclear Regulators' Association）が、原子力発電所をより安全にするための活動を積極的に実施し、その中で保全活動の最適化が進められている。 ● 防災については、NERISプラットフォームを中心に、さまざまなプロジェクト支援、共同研究が進められている。 ● 欧州各国では、チェルノブイリ原子力発電所事故以後、東欧地域でも法的枠組み、事業者・地方政府・国の緊急時対応計画、技術支援システム、評価・監査システムなど、防災システムの整備が進んだ。特に、国境を越える災害対応の連携に力を入れている³⁶⁾。

				<ul style="list-style-type: none"> ● 欧州委員会（EC）が迅速放射線情報交換システム（ECURIE）や放射線データ交換プラットフォーム（EURDEP）を長年整備している。 ● 過酷事故に関しては、これまでフランス、ドイツなどで大規模な炉心損傷・FP挙動実験が実施されてきたが、現在もIRSNなどで比較的大規模な実験を実施するとともに、総合解析コードASTECの開発がSARNETの枠で実施されている。 ● AREVA社（フランス）などで格納容器フィルターベント、水素再結合器などが実用化されている。IMI Nuclear社（スイス）はPSIと共同で有機ヨウ素を高率に除去できる第2世代格納容器フィルターベントを開発している。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 新規プラント建設や新型炉設計が積極的に進められており、原子力保全に関しても積極的な研究開発が進んでいる。 ● 過酷事故に関しては、上海交通大学、西安交通大学などで基礎的な研究が実施されている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● リスクやシビアアクシデントマネジメントなどに関する研究に、国家として積極的に投資している。 ● 上海交通大学、上海核工程研究设计院などで応用を目指した比較的大規模な熱流動実験が実施されている。 ● 近年の原子力発電所の増設計画に沿って、法的整備も進み、緊急時対応計画はIAEA基準に沿って整備されている。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● ソウル大学、KAIST、浦項工科大学校（UNIST）、韓国原子力研究所（KAERI）などで基礎的な研究が実施されている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 保全、防災においては、米国型の対応が整備されている。 ● 韓国原子力研究所などで応用を目指した格納容器健全性、コアキャッチャーなどに比較的大規模な実験が実施されている。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

（註2）現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）参考文献

- 1) 「原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書」、原子力災害対策本部、(平成 23 年)。
- 2) 「福島第一原子力発電所事故 その全貌と明日に向けた提言：学会事故調 最終報告書」、日本原子力学会、(2014 年)。
- 3) 「安全目標に関する調査審議状況の中間取りまとめ」原子力安全委員会安全目標専門部会、平成 15 年 9 月。
- 4) Lee McCORMICK (著), 西原 英晃, 杉本 純, 村松 健(訳), 「原子力発電システムのリスク評価と安全解析」, 丸善出版, (2013)。
- 5) SARNET - Severe Accident Research NETwork of Excellence. : <http://www.sar-net.eu>
- 6) Magallon, D., et al., European expert network for the reduction of uncertainties in severe accident safety issues (EURSAFE), Nuclear Engineering and Design, 2005, vol. 235, p. 309-346.

- 7) Jean-Pierre Van Dorsselaere, et al.; Sustainable integration of EU research in severe accident phenomenology and management, Nuclear Engineering and Design, 2011, vol. 241, p. 3451-3460.
- 8) Sugimoto, J.: Important Severe Accident Research Issues after Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Station, ICON21, July-August 2013, Chengdu, China.
- 9) 新規制基準について：
https://www.nsr.go.jp/activity/regulation/tekigousei/shin_kisei_kijyun.html
- 10) 確率論的リスク評価日米ラウンドテーブルについて：
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/genshiryoku/anzen_wg/pdf/011_01_00.pdf
- 11) 電気事業者の原子力安全研究への取り組み：
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/genshiryoku/anzen_wg/pdf/009_01_02.pdf
- 12) 原子力災害対策指針：<https://www.nsr.go.jp/data/000024441.pdf>
- 13) 「原子力災害対策充実に向けた考え方」原子力関係閣僚会議決定、平成 28 年 3 月 11 日
- 14) シビアアクシデント評価に関する調査研究報告書(中間報告)、「シビアアクシデント評価」研究専門委員会、平成 25 年 11 月
- 15) <http://www.f.waseda.jp/akifumi.yamaji/upload/research.pdf>
- 16) Yonomoto, T., et al., Thermal Hydraulic Safety Research at JAEA after The Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Station Accident, NURETH-16, August 30-September 4, 2015, Chicago.
- 17) Maruyama, Y., et al., Development and Application of Methodologies for Source Term Analysis, Proc. International Experts Meeting on Strengthening Research and Development Effectiveness in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, February, 2015, Vienna, Austria.
- 18) F. Nagase, R. O. Gauntt, M. Naito, “Overview and outcomes of Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi NPS (OECD/NEA BSAF Project)”, Proceedings of 16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-16) (USB Flash Drive) (2015).
- 19) 自主的安全性向上・人材育成ロードマップ
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denkijigyoku/jishutekianzensei/report_002.html