

記 録

文書番号	S C J 第 20 期 200908－20551100－014
委員会等名	日本学術会議総合工学委員会 エネルギーと科学技術分科会
標題	エネルギー諸問題における科学技術の役割 —現状と課題—
作成日	平成 20 年（2008 年）9 月 8 日

※ 本資料は、日本学術会議会則第二条に定める意思の表出ではない。掲載されたデータ等には、確認を要するものが含まれる可能性がある。

エネルギーと科学技術に関する分科会

委員長	矢川 元基	(第三部会員)	東洋大学計算力学研究センターセンター長・大学院教授
副委員長	本島 修	(連携会員)	自然科学研究機構核融合科学研究所所長、理事・副機構長
幹事	鈴置 保雄	(連携会員)	名古屋大学大学院工学研究科教授
幹事	高橋 桂子	(連携会員)	(独)海洋研究開発機構地球シミュレーションセンター複雑性シミュレーション研究グループリーダー
	伊藤 早苗	(第三部会員)	九州大学応用力学研究所教授
	笠木 伸英	(第三部会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	柘植 綾夫	(第三部会員)	芝浦工業大学学長
	山地 憲治	(第三部会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	相澤 清人	(連携会員)	(独)日本原子力研究開発機構特別顧問
	伊藤 公孝	(連携会員)	自然科学研究機構核融合科学研究所教授
	犬竹 正明	(連携会員)	東北大学電気通信研究所 客員教授
	井上 孝太郎	(連携会員)	(独)科学技術振興機構上席フェロー
	柏木 孝夫	(連携会員)	東京工業大学統合研究院教授
	田島 道夫	(連携会員)	宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部研究主幹・教授
	二ノ方 寿	(連携会員)	東京工業大学教授
	架谷 昌信	(連携会員)	愛知工業大学工学部機械学科教授・総合技術研究所長・総長補佐
	三間 罔興	(連携会員)	大阪大学レーザーエネルギー学研究センター長・教授
	山本 一良	(連携会員)	名古屋大学教授

報告書の作成にあたり、以下の方にご協力いただきました。

浅野 浩志 電力中央研究所 社会経済研究所 上席研究員

1 作成の背景

世界の国々の経済の発展に伴い、今後25年間に、世界の一次エネルギー需要は60%近く増加するであろうと推定されている。この先世界のエネルギー需要の85%が化石燃料によってまかなわれると予測され、将来にわたって大気中の温室効果ガス濃度の大幅な上昇を引き起こす。二酸化炭素の濃度は、1750年には280ppmであったものが、今日では375ppmを超え、最も高い数値を示している。温室効果ガスは気温の上昇を引き起こし、20世紀の間に地球の表面温度は約0.6℃高くなった。東京の平均気温は、ヒートアイランド現象も関係し、この100年間で3℃も上昇した。気候変動に関する政府間パネルIPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）の第4次報告書は、今、100年当たり0.74℃の速度で地球温暖化が進んでいると述べている。この温暖化は地球の気候・環境と人間生活に無視できない影響を及ぼしている。発展を続ける世界において、大気中に放出される二酸化炭素の量をくいとめる対策は、エネルギー問題における重要なテーマである。

2 現状及び問題点

エネルギー問題は、昨今の地球温暖化問題や環境問題と深くかかわっており人類にとっての大きなテーマである。その科学技術的解決法は人文社会的な方法とともにきわめて重要である。英国の「スターン報告」は、今の調子では来世紀初めに予測される世界の損害は国内総生産（GDP）の5～20%にもなるとした。そのうえで、「今後10～20年間の投資が今世紀後半以降の気候を左右する」と早期の行動を求めた。ここでわが国にとって必要なことは技術開発競争に後れをとらないことである。米国ではインターネットなど情報通信技術で世界をリードしたときのような国家計画を求める声が強まっている。一方の欧州は、「20年に自然エネルギー比率を20%に」という目標を掲げている。最近のわが国の動きとして、イノベーション25の中での議論、アジア諸国との連携に関する議論、クールアース・エネルギー革新技术計画に関する議論などがあるが、学術の、あるいは中立的な立場からの議論がさらに加わることが強く望まれている。

3 議論の内容

(1) イノベーション25と環境・エネルギー関連の科学技術

「イノベーション25」に不足している観点、特に、行政の分野別ではなく、社会あるいは科学技術に直接結びついた議論、また、各科学技術の優先順位や効果についての検討を進める必要がある。

(2) アジア諸国との連携

エネルギー資源の需給の逼迫とそれによる価格の高騰などへの対応は、エネルギー需要が急増しているアジア諸国との連携なしには解決しない。また、アジアには、バイオマス資源などの大きなポテンシャルを有する国がある。アジアはエネルギー産業の大きな市場としても期待されると同時に、温室効果ガスの抑制に重要な役割を果たす。日本は、エネルギー問題の解決と、日本の技術・産業の海外展開のため、日本が有するエネルギー分野の優れた技術をベースに、アジア諸国と連携し、これからの省エネ、再生可能エネルギーなどの技術開発を強力に推進すべきである。

(3) 新エネルギーおよび非化石エネルギー（原子力も含む）と科学技術動向

エネルギー研究開発については、人類の生存環境にかかわる緊急性が強く認識され、社会や世界全体との結びつきが今まで以上に強まっている。急速な温暖化

の対策として低炭素エネルギーの開発が重要であること、中国・インドなどの経済発展が温暖化に大きな影響を及ぼすと予想されること等が広く認識されている。基幹エネルギー源に加え新エネルギー開拓の動向が高まり、非化石エネルギーとしてのバイオ燃料や原子力に関連する科学技術動向を検討した。現世代のバイオ燃料には環境や社会に悪影響を及ぼす恐れがあり、緊急に科学的評価を行うことと、新世代のバイオ燃料研究開発を評価することが重要であるとの結果を得た。原子力エネルギー（核融合を含む）については、我が国では長期的視点に立って研究開発が実施されている。更なる展開のためには、人材育成など基盤についての課題も浮かび上がっている。社会とのかかわりも考察しつつ適切かつ強力に研究開発を進める必要がある。

(4) エネルギーと計算科学技術

我が国のエネルギーを支える科学技術は、原子力研究・核融合研究，地球規模での海洋・気象研究，マイクロエレクトロニクスや分子科学，生命科学等多岐に渡っており、エネルギーの発生・制御・利用に関する諸問題の解決のためには、計算機科学技術を基盤とする大規模シミュレーションが、重要かつ不可欠な手段である。これら広範な分野におけるシミュレーションの計算科学技術の連携と、人材の育成、産業界への展開が、今後の我が国のエネルギー戦略において、極めて重要である。

(5) 分散エネルギーシステム

低炭素社会を実現するための有効なオプションとして、集中と分散のベストミックスを達成する、ホロニック・エネルギーシステムがある。自然エネルギーを含む開発技術を少しでも早く社会に取り入れるためには、硬直的な需給体制を打破し、分散型エネルギー資源を活用した柔軟なエネルギー需給システムを構築することが有効である。

目 次

1	緒言	1
2	イノベーション 25 と環境・エネルギー関連の科学技術	3
(1)	はじめに	3
(2)	「社会システムの改革戦略」における科学技術	3
(3)	技術革新戦略ロードマップ	4
3	アジア諸国との連携	8
(1)	はじめに	8
(2)	連携の意義	8
(3)	連携すべき技術課題	8
(4)	連携の推進方策	9
4	新エネルギーおよび非化石エネルギー（原子力も含む）と科学技術動向	11
(1)	はじめに	11
(2)	バイオエネルギー	11
(3)	原子力エネルギー	13
5	エネルギーと計算科学技術	17
(1)	はじめに	17
(2)	計算科学技術	19
(3)	原子力工学と計算科学技術	22
(4)	核融合研究への応用例	26
(5)	その他のエネルギー開発と計算科学技術	29
(6)	大規模シミュレーションの社会的意義-産業界への広がり	30
6	分散型エネルギーシステム	33
(1)	はじめに	33
(2)	エネルギー分野におけるイノベーションに向けて	33
(3)	ホロニック・エネルギーシステム	34
(4)	主要な研究課題	36
(5)	日本からの新しいエネルギー需給モデルの発信	38
7	結び	40
	＜参考資料＞エネルギーと科学技術分科会審議経過	46

1 緒言

昨今のエネルギーに関する諸問題は地球温暖化対策と密接にかかわっている。エネルギー源（発電、熱、動力）、運輸、省エネルギー、炭素固定など、広い分野にわたる技術面および政策面での対策により、温室効果ガスの排出が少ない低炭素社会を構築していくことが必要である。また、今後 10～30 年ほどの間の努力が決定的に大きな影響を持つとされる。これまでも、地球温暖化の緩和策として様々な自主的な努力、および政策による対策が進められ、幾つかはその有効性が認められている。

最近の動きのひとつとして、経済産業省が、世界の温室効果ガスを 2050 年までに半減させるために、21 の開発目標を示した「クールアース・エネルギー革新技术計画」を発表した。効率 4 倍の太陽光発電や、電気自動車の値段を一般車並みに下げることなどを盛り込んだ。実現できれば、50 年で半減という温室効果ガス削減長期目標の 6 割を達成できるとみている。計画は、30 年ごろまでに実用化が期待できる技術を選び、性能や価格、普及時期の目標を掲げた。二酸化炭素（CO₂）を地中に埋める炭素回収・貯留技術は、20 年代に CO₂ の分離・回収コストをいまの約 4 分の 1 に抑え、実用化にめどをつける。燃料電池自動車は 20 年、電気自動車は 30 年までに、一般車並みの価格に下げる。補給なしでの走行距離も数百^{km}まで延ばす。同省によると、世界のガス排出量は 05 年で 260 億^{トン}となっており、対策をとらないと、50 年には 580 億^{トン}に増える見通しとなっている。「50 年で半減」には、450 億^{トン}の削減が必要となるが、この 6 割を革新技术の世界的な普及でまかなえると考えている。

このような具体的な政策においても見受けられるように、本分科会が関係するエネルギー供給面においては、下記のような技術が二酸化炭素排出量の削減に有効とされている。

- 各種エネルギー源の効率改善
- 小規模分散型エネルギー源の導入
- 再生可能エネルギーの普及
- 電化の促進
- 原子力発電の活用
- 長期的には、核融合炉、高速増殖炉、宇宙太陽光発電などの活用

一方、省エネルギー面においては、低電力消費の製品の普及や設備更新、電力・エネルギー消費が少ない経済システムへの転換、不要なエネルギー消費の削減、省資源などがあげられる。家庭や業務部門での節電は、エネルギー使用量の削減を通じて、火力発電などによる温室効果ガス排出量の削減につながる。関連して、多面的な循環型社会の形成を通じて、無駄なエネルギーの使用量を減らすことも有効とされている。

生物による炭素固定を促進することで、炭素吸収量を増加させることも有効と考えられている。また、地中や水中への二酸化炭素貯留の技術についても研究が進んでおり、実用化されれば特に石炭など安価な化石燃料の当面の重要なオプションになろう。

生活を意識的に変化させることによる持続型社会への転換の有効性や必要性も指摘されている。具体的には、ライフスタイル（生活様式）の変革により温室効果ガスの排出削減を目指すものである。

以上に述べたように、これらのエネルギー諸課題に対して科学技術が果たすべき役割はきわめて大きい。このような課題を議論するための場として、第 20 期の日

本学術会議総合工学委員会の下に「エネルギーと科学技術分科会」が平成 19 年 1 月に設置された。この分科会においては関係するテーマについてさまざまな角度からこれまで数度にわたって議論してきた。本レポートは、第 20 期が終了するにあたり、これまでの議論内容をいったんとりまとめて次期に引き継ぐ目的で、これまでの議論内容を 5 つの項目に分類して整理したものである。

2 イノベーション 25 と環境・エネルギー関連の科学技術

(1) はじめに

2025 年までを視野に入れた成長に貢献するイノベーションの創造のための長期的戦略指針として、「イノベーション 25」が閣議決定されている。ここでは多くの科学技術が取り上げられている。この中、「エネルギーと科学技術分科会」に関連する分野の科学技術についてとりあげる。

(2) 「社会システムの改革戦略」における科学技術

① 早急に取り組むべき課題

「イノベーション25の第5章 「イノベーション立国」に向けた政策ロードマップ」中の「1. 社会システムの改革戦略」には、「(1) 早急に取り組むべき課題」が列举されている。その中、「4) 環境・エネルギー等日本の科学技術力による成長と国際貢献」には、環境・エネルギー問題への対応はこれから世界の持続可能な成長を目指す上でも極めて重要性が高いものであること、特に成長著しいアジアにおいては環境・エネルギー等の対策に係る需要が増大していくものと見込まれることが指摘されている。これに対し、我が国のクリーンエネルギー、バイオマス利活用技術、省エネ・省資源ものづくり技術、IT・ナノテクノロジー・バイオテクノロジー等のハイテクや消費者の高度な感性を満足させる技術は、世界トップレベルにあり、我が国にとっては環境ビジネスをはじめ、これらの強みを活かしたイノベーションを創出していくチャンスでもあるとされている。こうした強みを中心に環境・資源・エネルギー等の世界的制約となる課題の解決に貢献し、技術開発や環境整備を通じて持続可能な産業体系・社会基盤・生活を実現することにより世界と日本の経済成長の原動力とするエコイノベーションを実現すべきであることが指摘されている。

このような考え方の下、実施すべき取り組みとして以下が挙げられている。

科学技術外交の強化

- ・開発途上国との科学技術協力の強化
- ・日本の優れた環境・エネルギー技術等の世界への発信、実証
- 先進的な地球観測衛星の観測データの提供、地球シミュレータ等による変化予測データの提供、災害関連情報の提供等、我が国の優れた環境技術の成果を途上国のニーズに応じて積極的に提供。
- 再生可能エネルギー、水管理、省資源・省エネルギー、二酸化炭素回収貯留、廃棄物処理・3R（リデュース・リユース・リサイクル）等、環境・エネルギー、水等の分野における我が国が世界に誇る技術について、産業界の参画の下、最も適地と考えられる場所で実証することを支援し、我が国の技術を世界へ普及。
- 世界の食料・バイオマス資源のモニタリング技術の開発、未利用資源の効率的なエネルギー化技術の開発、熱帯作物を利用した高バイオマス資源作物の育成等、食料とバイオマス作物の生産競合を回避し、それぞれの地域に適した安定的かつ持続的な生産・供給体制構築の支援。
- 温暖化に対してより脆弱な途上国における温暖化の影響研究や災害リスク管理等の能力開発、適応策に関する人材育成等の技術協力、アフリカ等の不良環境に耐性のある新品種の開発・普及、砂漠の緑化による食料需給の安定等、気候変動の緩和策と併せて適応策について、我が国の知見と技術を活用した技術協力等の国際貢献。

- ・アジア地域等における環境調和型制度創設の支援
- ・気候変動問題へのイニシアチブの発揮
- ・環境・エネルギー技術による気候変動問題への国際的取組強化
- ・世界の環境リーダーの育成
- ・先端科学技術分野での協力の強化

我が国の大学や公的研究機関の研究活動を海外にオープンなものとし、世界トップレベルの頭脳等多様な「異」との協働を通じた科学技術協力を積極的に推進する。特に、先端研究施設を積極的に海外開放し、相互利用を推進するとともに、研究者の受入れ・派遣、共同研究を推進する。

- ・科学技術協力ネットワークの強化

在外公館による科学技術外交機能を途上国中心に大幅に強化するとともに、大学を始めとする研究機関等の海外拠点に協力を求め、積極的に活用することにより、研究者等の国際的な活動の支援、相手国とのネットワーク強化等を図る。

- ・国際共同研究推進のための枠組み

② 中長期的に取り組むべき社会システムの改革

イノベーションを起こすような新技術・サービスは従来の制度・ルールの下では、社会に広く普及し難い場合も多い。このような場合は中長期的な取り組みが必要となる。その中で世界的課題解決に貢献する社会形成に関する科学技術的課題として、以下のものが挙げられている。

ア 実効ある温暖化対策の国際的取り組みの推進

「革新的技術の開発」＝経済発展と CO2 削減を両立するもの

革新的ゼロ・エミッション石炭火力発電

先進的原子力発電（高温ガス炉、中小型炉）

太陽光発電、燃料電池などの革新的技術

次世代自動車技術

水素を還元剤とした製鉄など

イ 低炭素社会構築へ向けた国内での積極的取り組み

地域単位でのエネルギー自立を目指した太陽、風力、地熱、バイオマス等自然エネルギー利用の促進

バイオ燃料の大幅な生産拡大に向けてエタノール高効率変換技術等の導入

(3) 技術革新戦略ロードマップ

限られた資源の中で政策課題に適確に対応するためには、個別分野毎に最先端の科学技術等に関する研究開発を選択的かつ集中的に実施することが必要である。このため、基礎研究から科学技術の社会適用までの全体を俯瞰して、研究開発のロードマップが策定されている。環境・エネルギー関連の分野別の戦略的な研究開発を表 2. 1 に示す。

以上、「イノベーション 25」に取り上げられている科学技術のうち、「エネルギーと科学技術分科会」に関連すると思われるものを紹介した。一方、日本学術会議は、「イノベーション 25」の策定に資するためイノベーション推進検討委員会を設置し、その報告書として、「科学者コミュニティが描く未来の社会」を 2007 年 1 月に公表している。分科会では、「イノベーション 25」とこの文書の内容の相違について議論が行われ、以下の点などが指摘された。

- ・「イノベーション 25」は行政の立場からまとめられた傾向が強く、各論の分野別戦略は、責任を持つ省庁と対応していると考えられる。学術会議の立場からは、社会あるいは科学技術に直接結びついた議論を行うべきである。
- ・「イノベーション 25」とそのロードマップの中には、優先順位や効果についての内容が欠けている。

今後これらの点を踏まえて議論を進める必要がある。また、アジアとの連携に関する指摘もあったが、これについては次章で取り扱う。

参考文献

- 1) イノベーション25戦略会議：“長期戦略指針「イノベーション 25」～未来をつくる、無限の可能性への挑戦～”，2007年5月
- 2) 日本学術会議：“科学者コミュニティーが描く未来の社会”，2007年1月

表2. 1 技術革新戦略ロードマップ：分野別の戦略的な開発の推進

戦略重点科学技術		2010年頃までの研究目標(第3期科学技術基本計画期間)	2011年以降の研究目標(第4期以降)
環境分野	効率的にエネルギーを得るための地域に即したバイオマス利用技術	・木質からのエタノール化において収率70%以上を実現しエタノール製造のコストを削減、化石燃料と競合可能な製造技術を開発。地域における最適な資源循環／バイオマスエネルギー利用システムの開発	・ゲノム研究等の成果を活用した高バイオマス量を持つ農作物の開発・導入や稲わらや木材等のセルロース系原料や資源作物全体からバイオエタノールを高効率に製造できる技術の開発 ・バイオマス由来のプラスチックの製造コストの低減 ・廃棄物・バイオマスによるエネルギー・材料生産分野において技術基盤を確立し、利用の促進に貢献。バイオマス発生源・利用地域に適合した効率的な収集・輸送・貯蔵システムの開発
ナノテクノロジー・材料分野	クリーンなエネルギーの飛躍的なコスト削減を可能とする革新的材料技術	・高効率燃料電池、超電導技術利用機器、廃熱利用熱発電技術など	・燃料電池自動車の性能向上 ・エネルギー分野への超電導技術機器の実用化など
エネルギー分野	エネルギーの面的利用で飛躍的な省エネの街を実現する都市システム技術	・最適な熱エネルギー利用システムを評価するシミュレーション技術を開発し、下水道本管に直接ビル廃熱を廃棄する技術及び小規模で拡張可能な熱エネルギー利用システムのプロトタイプの開発	・一部の都市における開発した熱エネルギーシステムの導入・実用化
	実効性のある省エネ生活を実現する先進的住宅・建築物関連技術	・街区レベル及び戸建住宅にも適用可能な環境性能評価手法の開発と既存住宅ストックの断熱性能を非破壊等により評価するための技術の開発	・自然エネルギー利用等も含めた住宅・建築物の省エネ化、断熱材の高性能化、住宅・建築物におけるエネルギーマネージメントシステム等の技術開発
	便利で豊かな省エネ社会を実現する先端高性能汎用デバイス技術	・飛躍的な省エネルギー等を実現する高効率インバータの実現と情報家電の低消費電力化、高度化(多機能化等)に資する半導体アプリケーションチップ技術の開発と高速度・低消費電力デバイスの実現	・半導体等デバイスの高効率化、高機能化、高集積化、システム化、大容量化等の技術開発
	究極の省エネ工場を実現する革新的素材製造プロセス技術	・高効率酸化触媒を用いた環境調和型化学プロセス技術などの要素技術等の確立と複合化材料技術の確立 ・フレキシブルディスプレイ実現のための部材およびそれらをロールtoロール化するための技術の開発 ・革新的製鉄プロセス技術等、省エネ型鉄鋼製造技術の基盤技術の開発	・従来にないロールtoロールプロセスによるフレキシブルデバイスの高速低コスト技術の実用化
	石油を必要としない新世代自動車の革新的中核技術	・リチウムイオン電池の小型化・高性能化技術の開発と単層カーボンナノチューブの高度配向技術及び大量生産技術の確立 ・高エネルギー密度と耐久性を有する電気二重層キャパシタの開発	・リチウムイオン電池の性能向上と低コスト化に資する技術の開発
	石油に代わる自動車用新液体燃料(GTL)の最先端製造技術	・商業規模でのGTL(ナフサ、灯油、軽油等石油代替用として天然ガス等を原料として製造される合成油)製造技術の確立	・ガス体エネルギーの導入等に資するGTLの製造コストの低減、利用機器の開発等
	先端燃料電池システムと安全な革新的水素貯蔵・輸送技術	・供給施設の安全対策等の確立 ・燃料電池自動車や定置用燃料電池、水素供給システムについて、低価格化、高耐久性、高機能化を達成する技術の確立	・燃料電池自動車や定置用燃料電池、水素供給システムについて、更なる低価格化、高耐久性、高機能化を達成する技術の確立 ・地域資源を活用した水素利用技術の高度化、実証試験

表2. 1 技術革新戦略ロードマップ：分野別の戦略的な開発の推進（続き）

戦略重点科学技術		2010年頃までの研究目標(第3期科学技術基本計画期間)	2011年以降の研究目標(第4期以降)
エネルギー分野	太陽光発電を世界に普及するための革新的高効率化・低コスト化技術	・太陽光発電の高効率化、低コスト化のための技術開発、実証による太陽光発電の経済性の向上	
	電源や利用形態の制約を克服する高性能電力貯蔵技術	・低コスト化、高信頼性化等を達成したSMESシステムの確立。イットリウム系線材等による大容量化、高性能コイル等の基盤技術の開発 ・高エネルギー密度で高耐久性な電気二重層キャパシタの開発	・数十～数百kWh規模の商業ベースでの導入等を目指したイットリウム系線材等を活用したSMESの更なる高性能化等の実現
	クリーン・高効率で世界をリードする石炭ガス化技術	・石炭ガス化複合発電(IGCC)について、実証試験の実施による石炭をガス化して利用する高効率発電技術の確立	・石炭のクリーンで高効率な利用の促進に資する石炭ガス化技術の確立
	安全性・経済性に優れ世界に普及する次世代軽水炉の実用化技術	・高い経済性・安全性等を備え、世界市場にも通用する次世代炉技術を選定し、開発のための中長期的研究開発戦略を策定	・高い経済性・安全性等を備えた、世界市場にも通用する次世代軽水炉技術の確立
	高レベル放射性廃棄物等の処分実現に不可欠な地層処分技術	・地質の異なる2つの深地層研究施設(幌延、瑞浪)において中間深度までの調査研究を行い、処分事業や安全規制を支える知識基盤として体系化 ・人工バリアの製作・施工等の品質や性能を含む工学技術について成立性等を提示	・高レベル放射性廃棄物の最終処分開始に至る処分事業や安全規制に必要な基盤となる技術の整備
	長期的なエネルギーの安定供給を確保する高速増殖炉(FBR)サイクル技術	・高速増殖炉サイクル実用施設(炉・サイクル)に採用する革新技術をまとめ、プラント全体の概念設計を構築し、経済性の高いMOX燃料製造技術の小規模実証、燃料の高燃焼度化の実証及び燃料サイクル技術の実証	・もんじゅについて発電プラントとしての信頼性の実証、ナトリウム取扱技術の確立等の所期の目的を達成することにより、高速増殖炉システム設計技術を実証 ・将来の軽水炉と比肩する安全性、経済性を有するとともに、資源有効利用、環境負荷低減、高い核不拡散性等を有する高速増殖炉サイクルの適切な実用化像と、実用化に至るまでの研究開発計画の提示
ものづくり技術分野	国際協力で拓く核融合エネルギー:ITER計画	・ITER完成・運転開始を目指して国際的に合意されたスケジュールに基づき、我が国が分担する装置・機器を着実に開発及び製造製作するとともにITERと連携して実施する幅広いアプローチにより、原型炉設計を進展	・ITERの建設・運転やこれに連携した幅広いアプローチを通じた燃焼プラズマの実証 ・原型炉建設に必要な炉心プラズマ技術、核融合工学技術の基盤の構築
	ものづくりプロセスの省エネルギー化	・製造業に係る製品のライフサイクルを考慮した設計支援システムの開発、それによる生産プロセスにおけるエネルギーロスの低減を通じた、省エネルギー化の実現	・製鉄所の廃熱を利用した製鉄プロセス技術、省エネルギー省資源に資する化学製造プロセス技術、熱電変換システム等のエネルギー有効利用技術を確立し、製造プロセスからのCO2排出の削減等、地球温暖化対策に貢献

3 アジア諸国との連携

(1) はじめに

エネルギー資源の需給の逼迫とそれによる価格の高騰などへの対応は、エネルギー需要が急増しているアジア諸国との連携なしには解決しない。また、日本の技術・産業の将来を考えると、アジアには、再生可能エネルギーとして有望視されるバイオマス資源などの大きなポテンシャルを有する国があり、また、アジアはエネルギー産業の大きな市場としても期待されるなど大きな魅力がある。したがって、エネルギー問題の解決と、日本の技術・産業の海外展開のために、日本が有するエネルギー分野の優れた技術をベースに、アジア諸国と連携し、これからの省エネ、再生可能エネルギーなどの技術開発を強力に推進し、普及すべきである。

(2) 連携の意義

エネルギーに関する科学技術についてアジア諸国との連携が重要なのは以下の理由による。

- ① 石油に代表されるエネルギー資源の減耗の加速、需給の逼迫とそれによる価格の高騰が起こっている。これは、工業先進国における化石燃料の大量消費のうえに、開発途上国、とくに中国、インドを始めとしたアジア諸国の消費量の急増が加わったためであり、アジア諸国の協力、アジア諸国との連携なしには事態は改善されない。
- ② 日本はエネルギー分野において優れた技術を数多く有しているが、国内の市場には限界があり、技術・産業の海外展開が必要であるが、海外展開は欧米に比して遅れていると言わざるを得ない。日本が有する技術をベースにそれぞれの国、地域の状況に適した技術を共同開発することにより、技術・産業の海外展開、とくに大きな市場・生産地かつ重要なパートナーとなりつつあるアジア諸国への展開を強力に推進すべきである。
- ③ 日本が努力し開発してきた技術がほとんど無償の形で流出したり、逆に世界標準から外れ埋没したりする恐れがある。アジア諸国との連携を戦略的に推進することにより、技術が適正に評価され、世界標準へと育成されることが期待できる。
- ④ アジア諸国のいくつかは、高温多湿の気象条件にあり、化石資源代替の有力な候補であるバイオマス資源について大きなポテンシャルを有する。日本はそれらの国々とバイオマス資源の育成や燃料への転換などについて早期に共同研究を本格化し技術を共有する必要がある。
- ⑤ 以上を実現するためには、アジア諸国との技術の共有、人材ネットワークの構築が不可欠である。

(3) 連携すべき技術課題

エネルギーに関する科学技術について、アジア諸国と連携すべき主な課題は以下の通りである。それぞれの地域に適合した技術である必要があるが、全体的に、とくに高効率・低環境負荷と同時に低コストであることが要求される。低コスト化は企業の仕事であるとして、コストについての議論、検討を嫌う研究者もいるが、低コスト化は、高度な研究課題であることを認識する必要がある。

① 原子力エネルギー利用

アジア諸国のニーズに合致し、国際的に設置・運転の合意が得られるものである必要がある。

- ・ 高安全・高信頼で運転管理が容易な中型炉

- ・核不拡散対応燃料サイクル
- ・廃棄物処理システム

② 化石燃料の高度利用

効率向上による化石資源の節減、排出ガスの浄化が必要。今後も石炭火力が多く使われる可能性が高いことも配慮すべき。

- ・高効率コンバインドサイクル
- ・排出ガスの脱硫、脱硝
- ・クリーン・コール・エネルギー・システム
- ・排出ガス中の二酸化炭素の分離、貯蔵

③ バイオマス利用

高温多湿でバイオマスの生産に適した地域が多い。農耕地や農業用水などについての食糧生産と競合が少なく、経済的に成立する事が必要。広大な乾燥地もあり、この利用も課題。

- ・有効成分を利用しやすい形で多く含み、かつ高成長のエネルギー作物、耐乾燥性作物の育種
- ・低肥料、節水型の栽培技術
- ・セルロース、リグノセルロース、リグニンなどの分解、発酵、燃料・工業資源への変換
- ・バイオマス起源の有用な燃料、工業原料およびそれらの製造プロセスの開発
- ・海洋バイオマスの育種、栽培、回収、有用物質への変換などの利用技術

④ 太陽電池

都市や僻地での小規模な設備の他に、日本と異なり、広大な乾燥地域の利用も考えられる。この地域の太陽電池に限らないが、電力用としては、EPR (Energy Profit Ratio、エネルギーの取り出し量とそれに要するエネルギー量の比) の高いことが必須。

- ・効率向上、コスト低減、長寿命化

⑤ 省エネ生産

エネルギー多消費産業を中心に抜本的な省エネ、エネルギー生産性の向上が必要。現在の日本のレベルでも全く不十分である。

⑥ 省エネ製品

自動車を始めとした輸送機器、空調設備、家電品、照明器具などの抜本的省エネが必要。

⑦ 省エネ型都市設計

都市構造自体を省エネに適したものにする必要がある。例えば、輸送については、自動車の使用をできるだけ抑えるシステムの開発も課題。

(4) 連携の推進方策

日本は、化石資源の需給逼迫、化石資源の大量使用による温室効果ガスの増大や環境汚染などのアジア諸国ひいては地球規模の問題、ニーズに応えると共に、日本の産業・技術を一層強化発展させるため、アジア諸国との連携により、日本で開発されてきた技術、産業力をベースに国際協力・海外展開を進めるべきである。そのために、政府は基礎研究の支援、日本と同じ技術ベースを持つ国際人材の育成、国際協力・国際展開の枠組み作り、技術・制度の標準化等を主導し、開発途上国が経済援助や技術移転を受けるだけではなく、国際的に協調しながら自主的に課題解決に取り組めるようにすることと、民間企業が経済ベースで活動できるようにすることが重要である。国は、開発途上国との科学技術協力政策の一環として、従来からの技術移転事業などに加え、20年度より、外務省のODAと文

部科学省の科学技術予算を連携した発展途上国との共同研究事業を開始するが、規模が小さい。さらに拡充すべきである。

連携を推進するための国の具体的取り組みとして以下を提案する。

- ① 国際研究協力、技術支援の枠組みの作成と推進・支援
- ② 日本及びアジア諸国の産・学・官協力による将来のエネルギー技術・産業についてのグランド・デザインの作成
- ③ 国内及びアジア諸国の人材の育成支援
- ④ 技術・工業規格・制度・安全基準・環境基準などの国際標準化の推進・支援
- ⑤ 産との連携による国際競争と国際協力・協調の切り分け戦略の作成
- ⑥ 原子力施設などの研究開発、建設、管理についての支援

4 新エネルギーおよび非化石エネルギー（原子力を含む）と科学技術動向

(1) はじめに

国連気候変動枠組み条約第13回締約国会議（COP13）は、2013年以降の新たな温暖化ガス削減の枠組み作りに関し、2009年末までを交渉期限とする行程表「バリ・ロードマップ」を採択した。（削減の数値目標は今後議論する。）温暖化ガス削減では、具体的技術論がさらに重要になっている。

「温暖化対策の国際的動きが急」という視点からは、温暖化ガス削減にかかわる技術を総覧し評価するというような議論もあり得る。例えば、次のようなキーワードがあげられる。

省エネルギー

エネルギー効率、エネルギー使用の合理化に関する法律、コジェネレーション、消費電力、待機電力、熱回収、熱効率、燃費、燃料電池、発光効率、断熱

再生可能エネルギー

海洋温度差発電、水力発電、太陽光発電、地熱発電、潮力発電、燃料電池、バイオ燃料、波力発電、風力発電

ここでは、新エネルギーの生産という観点から、バイオ燃料について問題の設定と議論を紹介すると共に、原子力エネルギー及び核融合研究に触れる。

(2) バイオエネルギー

バイオ燃料が急速に生産されつつある。社会へのインパクトが大きいので、科学的評価の状況を概観する。現世代のバイオ燃料には大きな危険性をはらんでいる可能性があり、緊急に科学的評価を行うことと、新世代のバイオ燃料研究開発を評価することが重要であろう。

① 問題の設定

石油代替燃料として、バイオマス燃料は（CO₂を植物が光合成で固定した故に）CO₂排出を低減できると考える見方がある。地球温暖化対策のため、石油をバイオマス燃料に置き換えようという動きがある。概念図を図4.1に示す。

バイオマス燃料の生産が、現代社会に大きな影響を及ぼすことが明らかになってきている。例えば、食料を燃料として消費する事が、社会に大きな影響を持つ事が既に指摘されている。（トウモロコシ 25kg からバイオエタノール 10 リットル。）世界規模の食糧事情へのインパクト、また、バイオマス燃料生産のための環境破壊など、広範な影響が現れ始めている。社会においてもバイオ燃料生産がもたらすインパクトを取り上げ、適切な開発の重要性を訴えている¹⁾。

実際に地球温暖化にとってバイオマス燃料が良いのか否か、科学的に評価する必要がある。

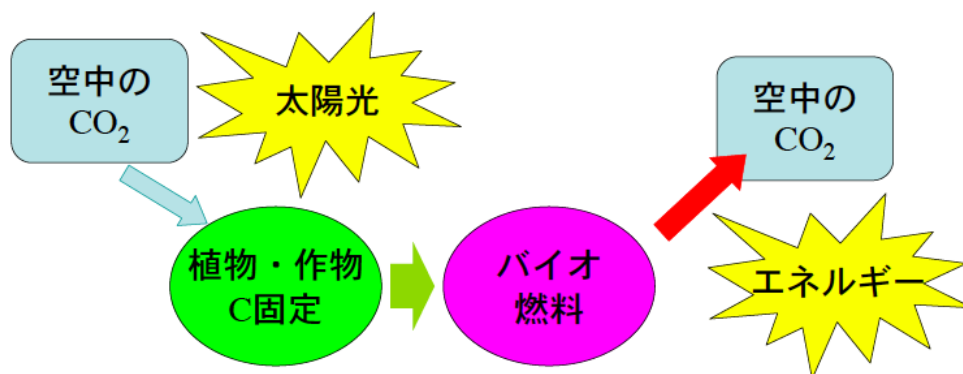


図4.1 バイオマス燃料が地球温暖化低減効果を持つという見方

② アセスメントの一例

例えば、OECD は

Round Table on Sustainable Development

BIOFUELS: IS THE CURE WORSE THAN THE DISEASE?

というアセスメントをまとめ、環境や生活環境に対するインパクトも含めた既存のバイオ燃料の問題点を述べ、次世代バイオ燃料の開発の重要性を述べている²⁾。付録 4a に概要を紹介するが、要点は以下の通りである。

アセスメントの結果「人口増加に伴う食料供給に問題を起こす事無く、バイオマスから世界のエネルギー消費要求に寄与しうるスケールと害の少ない安定した方法によって、バイオ燃焼を作り出す技術的方法は有るのだろうか？現行の各国の並びに国際的政策は費用対効果の最も高いものなのだろうか？」という根本的疑問が生まれる。更に、作物の燃料への転換を急げば、益少なくして食料不足をもたらす種の多様性を損なう恐れが有る。第二世代のバイオ燃料は、問題解決の希望を与えるが、技術的ブレークスルーを必要とする。経済的な展望も税塾である。各国でのバイオ燃料生産を保護しようとする政策は、効率が低く、費用対効果が悪く、更には衝突を生むだろう。世界全体の問題解決という観点からは、バイオ燃料の貿易自由化が（困難では有るが）必須である。バイオ燃料の認証は、適切な使用習慣にとって有効では有るが、セイフガードにはならない。

近未来の政策に関する多数の視点も述べられており、それらもあわせて付録 4a に概要を紹介する。

③ 新たな問題点

ドイツ・マックスプランク化学研究所の P. J. Crutzen (オゾンホールの問題で、ノーベル賞受賞) は、植物が生育のために窒素を取り込むことに着目し、バイオマス燃料を生産し消費する過程で生成される N_2O の量を評価した。(概念図を図 4.2 に示す。)

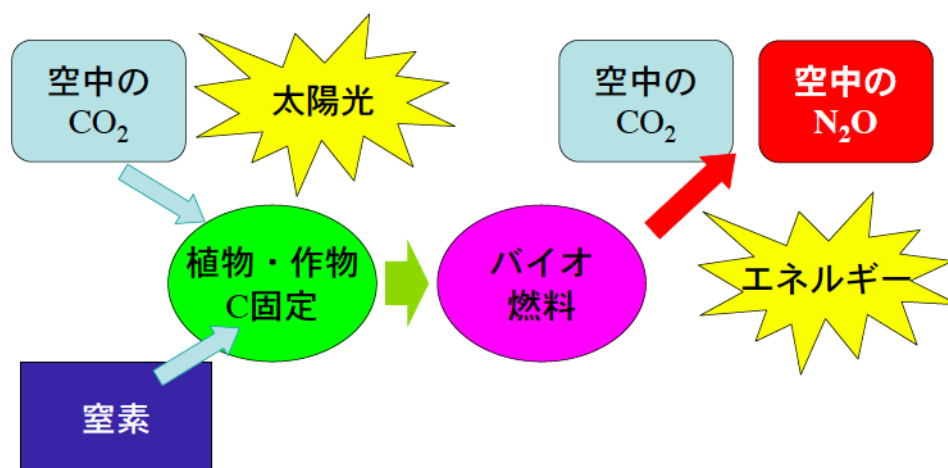


図 4.2 バイオマス燃料からエネルギーを取り出す過程で、固定された窒素を N_2O として放出する。 N_2O による地球温暖化効果は、 CO_2 を節約した効果を打ち消して、温暖化を加速する可能性がある。

表 4.1 に引用するように、最近の研究では、多くの場合、化石燃料をバイオマス燃料に置き換えた場合、 N_2O によって増える温暖化効果が、 CO_2 の固定による低下分を超えてしまい、結局温暖化効果を加速してしまう可能性が強い事を

指摘している。危険性の大きな穀物も論じている³⁾。

表 4.1 に引用した評価では、穀物を燃料に転換する過程でのエネルギーを考慮せず、また、畝に投入される窒素（肥料に含まれる）が作物以外の形で N_2O へと空中に放出されるプロセスも含んでおらず、さらに大きな温暖化効果を持っている可能性を論じている。包括的な評価を行う事の重要性を論じている。

表 4.1 N_2O による温暖化へのインパクト (CO_2 削減効果との比較)

Crop	$r_N(\text{actual})$ (g N/kg dry matter)	Relative warming (Meq/M) (N-efficiency $e=0.4$)	Type of fuel produced
Rapeseed	39	1.0–1.7	Bio-diesel
Maize	15	0.9–1.5	Bio-ethanol
Sugar cane	7.3	0.5–0.9	Bio-ethanol

Table 1. Relative warming derived from N_2O production against cooling by “saved fossil CO_2 ” by crops as a function of the actual nitrogen content $r_N(\text{actual})$. Uncertainty ranges presented derive from the uncertainty of the yield factor y (see text). [P. J. Crutzen, et al.: Atmos. Chem. Phys., 8, 389–395, 2008]

④ 論点

以上の議論から分かることは、現世代のバイオ燃料には大きな危険性をはらんでいる可能性があり、緊急に科学的評価を行うことと、新世代のバイオ燃料研究開発を評価することが重要であろう。

(3) 原子力エネルギー

① まえがき

原子力エネルギーの役割については、科学技術的な課題と社会の受容性のふたつの側面がある。前者については、世界的に共通の先端科学技術としての活発な活動が行われている。一方、社会的受容性については、国情によって差異がある。

先端科学技術としての原子力エネルギーについては、我が国では原子力委員会による長期的視点に立った開発研究計画が策定されてきた。国内の各セクターで担当され実施されている。ここでは資料を紹介することによって最近の状況について触れることにする。

② 原子力発電

現在の原子力発電に於いては、現世代の核分裂炉がエネルギー源として大きな柱の役割を果たし、また次世代炉の研究開発も進んでいる。開発方針を主管する原子力委員会は「平成18年度原子力白書」において次のような考えを示している⁴⁾。

「世界では、途上国を中心としてエネルギー消費が増大している。そのため、各国の政策においてエネルギー資源の安定確保が重要課題となってきた。

他方で、現状のまま化石エネルギー資源を大量に消費しつつ高い経済成長を追及していくと、21世紀末には平均気温が約4.0度上昇することが予測されるとする気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第4次報告書が公表された。これにより、地球温暖化対策を一層充実する必要性が高まり、世界各国で重要政策課題として再認識され始めている。

こうした情勢を背景に、エネルギーの安定供給と地球温暖化対策の双方を追

求する中核的手段として、原子力発電を再評価する先進国や、これを新たなエネルギー源として導入することを目指す途上国が増えてきている。さらに、産業界においても、ウラン価格の高騰に対応した資源開発への投資活動や、原子力資機材市場の国境を越えた原子力産業の再編が進行している。

しかしながら、国際社会では同時に、新たに核兵器を保有しようとする国の存在や核テロリズムに関する脅威の増大を踏まえて、核不拡散や核テロ対策等のための取組を強化することが強く求められている。本章では、エネルギー安定供給と地球温暖化問題への対応を目指して世界各国で見られる原子力発電の新しい流れ、核不拡散の強化に向けた新たな動き等、原子力に対する期待の高まりに伴って発生している新しい挑戦や課題に各国や国際機関が取り組んでいる状況を解説する。その上で、ダイナミックな変化の過程にある国際情勢に直面して、我が国が将来に向けて正面から取り組むべき課題とそれに対する取組の基本的考え方について述べることにする。」以上の観点から取り組みを説明しているとともに、「皆様にお知恵をお出しいただきたいと願っている課題を8つあげますが、その第一は、人類社会が直面しているエネルギーと環境の問題の解決に貢献する技術の評価に関する政策判断指標の整備です。」等の課題をあげて⁵⁾科学者界との課題共有の努力が進んでいる。

こうした進展を踏まえつつ、長期的かつ継続的な適切な振興を図るためにも、次のような視点からの問題についても時期に応じた解決への努力が求められよう。

原子力関係の研究は、やろうと思っても、すぐにはものにならない。現在、原子力の重要性が再認識され、原子力大綱が決定されて確固たる国の方針が示され、原子力ルネッサンスとか呼ばれているが、原子力の研究・教育の現場から見れば、厳しい現状にある。大学や研究機関の原子力関係設備は、昭和30年代から50年代にかけて整備されてきた。しかし、その後の手当てはあまりなされておらず、どこも老朽化に悩まされている。核燃料や放射性同位元素を扱うことのできる実験室は、維持管理が困難になって、年々減少している。大学が法人化され、人件費も削減され、この傾向はいつそう深刻になってきている。このような原子力の研究・教育の質の低下が認識され、最近、この分野に競争的資金が投入されてきたことは喜ばしいことではあるが、しかし、競争的ということに伴う欠点もある。それは、結果の出やすい研究、プロジェクトしか生き残らず、長い目で見た研究、競争的資金に応募する前の新規のアイデアを確かめる段階の研究をなす余裕がなくなっていることである。核燃料、放射性物質を使わない実験、ましてや計算機だけに頼る研究だけでは、原子力の教育・研究は進まないことを再認識すべきである。こうした問題は看過出来ないものであり、日本学術会議としても検討を進めていく必要がある。

③ 核融合炉研究開発

核融合エネルギーの研究は、核融合燃焼状態を制御して実現することが出来れば、資源の容易さや環境整合性などの長所をもった大規模エネルギー源を構成できると考えられ、世界的に研究が進められてきた。

最近の状況では、国際核融合燃焼実験炉(ITER)計画が実現し、建設段階に入るなど、歴史的展開を迎えている。高温プラズマの閉じ込めが今までの最大の課題である。ITERを用いた研究へと展開するなかで、磁場を使う方式では我が国独自の方式である大型ヘリカル装置(LHD)による研究や、レーザーを用いる慣性核融合方式などの研究が活発に行われている。このような科学技術的展開は文献6に詳細に示されている。同時に注視すべき事柄は、ITERが国際機関であ

り、エネルギー開発を国際機関で行うと言う展開である。先進科学技術開発であると同時に基幹エネルギー開発を国際機関に於いて国際協力で推進すること自体が、新たなチャレンジである。国際機関 ITER の発足と活動状況、そしてこれからの展望が文献 7 に示されている。現在の状況をいくつかの視点で紹介する。

核融合研究開発は国が中心となって推進する段階にある。原子力委員会は、平成17年10月「今後の核融合研究開発の推進方策について」(<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/kakuyugo2/siryo/kettei/houkoku051026/index.htm>)を取りまとめた。その報告書に関して次のように述べその方向での今後の核融合研究開発の推進方策を示すなどの決定を行っている。⁸⁾「同報告書は、チェック・アンド・レビューの結果、(1)トカマク方式については、ITERの建設に必要な研究開発において我が国が主要な役割を果たして、ITERの工学設計が確定するとともに、次段階につながる研究開発計画を具体化するための基盤が形成された、(2)トカマク方式以外（ヘリカル方式とレーザー慣性閉じ込め方式等）においては学術研究として研究が着実に進展した、(3)核融合炉工学技術が着実に進展するとともに、その成果はナノテクノロジー・材料、ライフサイエンス、情報・通信、環境分野等多くの産業分野に波及効果をもたらしたと評価し、核融合研究開発は第三段階計画に沿って着実に進展していると結論している。その上で、同報告書は、研究開発の効果的かつ効率的推進の観点及び高い経済合理性の追求の観点から、原型炉の目標を一定の経済性を有するものとするを含め、今後の核融合研究開発の推進方策を示している。」一方、学術研究の側面からの科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会の委員会に於ける検討をすすめている。そこでは、今後の推進方策として、ITER計画及び幅広いアプローチを中心とした研究開発の推進、学術研究の推進（重点化課題の推進、共同研究の推進、様々な分野との学術的連携）、産業連携、人材の育成・確保及び国民への説明、といった課題が掲げられ、「今後とも、開発研究と学術研究が、研究段階に応じてそれぞれの特徴を生かしつつ、一層融合・連携させながら推進する事が重要である。」と提言されている⁹⁾。

以上、かいつまんで最近の新エネルギー研究開発の状況を述べた。狭い意味での科学技術的なチャレンジに向かって大きな取り組みがなされている事と、社会や世界全体との結びつきの強さが際立っている。「エネルギーと科学」の視点からの評価を正確に押し進める事が第一であるが、同時に「エネルギーと社会」の視点からの評価との連携が今後の日本学術会議の取り組みで重要であろう。

参考文献

- 1) 鳥井弘之：『ニュースの深層』” バイオガソリンは地球温暖化防止の救世主か？” (2007年5月17日)
- 2) Richard Doornbosch and Ronald Steenblik: “Round Table on Sustainable Development BIOFUELS: IS THE CURE WORSE THAN THE DISEASE?” SG/SD/RT (2007) 3
- 3) P. J. Crutzen, A. R. Mosier, K. A. Smith, and W. Winiwarter: “N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing

- fossil fuels “, Atmos. Chem. Phys., **8**, 389-395, 2008
- 4) 原子力委員会「平成18 年版原子力白書」(平成19年3月)
 - 5) 原子力総合シンポジウム2007に於ける原子力委員長の講演「原子力学界に検討をお願いしたい課題」(平成19年05月30日)
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2007/kettei/speech070530.pdf>
 - 6) 松田慎三郎、他：ITER を字句としての核融合開発と最近の成果”，日本原子力学会誌 49 (2007) 259
 - 7) 池田要：“ITERの現状とITERの望む人材”，J. Plasma Fusion Res. Vol. 84, No. 1 (2008) 3-9
 - 8) 原子力委員会決定：「第三段階核融合研究開発基本計画における今後の核融合研究開発の推進方策について」(平成17年11月1日)
 - 9) 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力分野の研究開発に関する委員会 核融合研究作業部会：「ITER 計画、幅広いアプローチをはじめとする我が国の核融合研究の推進方策について」(平成 19 年 6 月 27 日)

5 エネルギーと計算科学技術

(1) はじめに

地球のエネルギー循環を含めエネルギーシステムは大規模な非平衡開放系である。そのダイナミックスを把握し制御するため、観測や実験による“経験的な洞察”に合わせ、地球シミュレーターの研究成果に観られるように、計算科学技術の活用による予測が重要である。エネルギー科学は、エネルギーの発生・制御・利用に関連する原子力研究・核融合研究、地球規模での海洋・気象研究、マイクロエレクトロニクスや分子科学、生命科学等多岐に渡っており、これらの分野で大規模シミュレーションなど計算科学技術が重要な課題解決の手段として用いられてきた。一方、研究対象である大気現象、原子核過程、プラズマ現象、生命現象、固体表面現象等が非線形非平衡非定常状態であるため、シミュレーションによる予測研究が不可欠であること、ミクロマクロが直接的に結びついた現象かつ、様々な物理状態の複合系であり単純化して理論解析することが難しいことなどが理由で、長年にわたり計算科学の発展を牽引してきた。この状態が今後とも続くことは間違いなく、これらの分野から派生した各種研究分野も含め、さらに大規模の計算が研究推進にとって重要であることは明らかである。

エネルギー問題は、資源の乏しい我が国にとって最重要課題の一つであり、エネルギー研究の推進は、我々の生活に必要不可欠のものである。世界最大級のスーパーコンピュータが完成されれば、エネルギー分野のシミュレーションがこれを最も有効に利用し、大きな成果を上げ、我々の将来のために不可欠な技術革新（イノベーション）を輩出することは疑いのないところである。図1に示す様にエネルギーと環境の科学(ET)はナノ科学、生命科学と並んで大規模コンピューティングの重要な研究目的である。米国においては現在エネルギー省(DOE)の施策もあり、広い意味のエネルギー科学が次世代スーパーコンピュータ技術開発を牽引している。

加えて、昨年発表された第4次IPCCレポートでは、地球温暖化における人為的な活動による原因が明らかになったことから、エネルギー問題に対する我が国の取り組みは、さらに重要性を増していると同時に、我が国がとりくまなければならない火急の課題として位置づけられる。地球温暖化問題への対処として叫ばれているmitigation, adaptation, geo-engineeringのいずれにおいても、その対策の定性的、定量的評価の両面から、エネルギー問題におけるシミュレーション技術あるいは計算科学技術の確立は、我が国における不可欠な課題である。

過去20年間にわたるスーパーコンピュータの性能の進歩は目覚ましい。現在計画中の次世代スーパーコンピュータへの進展もその延長上にある。このような計算機性能の向上はエネルギーに関連する科学技術の将来と切り離せない。しかし、今後ともハードウェア性能が指数関数的に成長し続けたとしても、ここで認識をしておかなければならないことがある。すなわち、我々が肌で感じ、眼で見ることができる現実世界における現象や営みを代表する空間サイズ(長さ)と時間に関するマクロスケールと、これらの現象の根源にある分子、原子、電子レベルでのミクロスケールの隔たりは極めて大きい。そのため、ミクロスケールにおける第1原理計算の拡大によってマクロスケールのダイナミックスを捉えるシミュレーションが実現する見通しはないし、実現させる必要もない。その代わり、階層間の相互作用を記述する新たな多階層連結コンピューティングが必要となる。特に、エネルギー科学、環境科学、材料科学、化学・生命科学など様々な研究開発分野において、素要素レベルのミクロ階層とシステムレベルのマクロ階層

の相互作用を、各階層のダイナミクスと共に捉えることができる総体的 (holistic) なシミュレーションの実現が緊急の課題となる。本章では計算科学技術におけるシミュレーションについて、背景、あるべき姿、現状や将来の役割と意義について述べることにする。

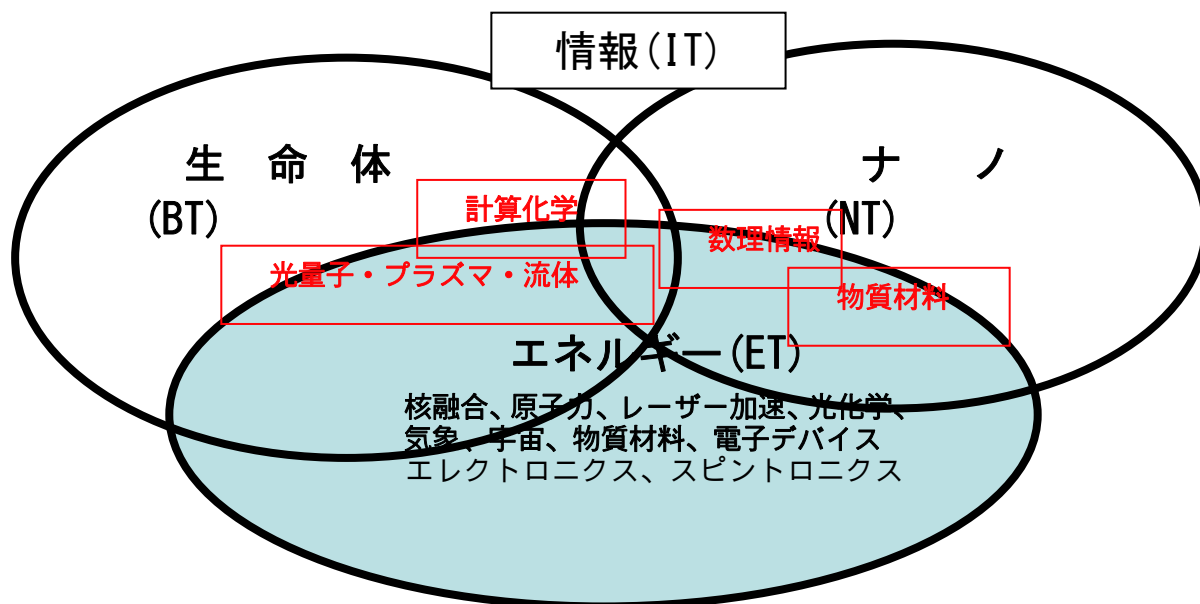


図5. 1 エネルギー科学分野は融合型の科学技術¹⁾

例えばエネルギーを搬送する流体は分子の集まりである。しかしながら個々の分子の挙動を追いかけるわけにはいかない。我々が行うのは流体がこれらの分子の集合体であり、連続体としてみなすことができるほどに十分高い分子密度であることを条件に、これら分子の集合体を粒子とみなしてボルツマン輸送方程式を解くことができる。このアプローチは分子レベルからみた場合、十分マクロである。しかし実際には、我々はボルツマン輸送方程式を解くわけではない。一般的なエネルギーの利用に関わる工学においては、むしろ連続体力学としてさらに近似されたナビエ・ストークス方程式とエネルギー輸送方程式を解けば実用上十分なのである。もしこれらの方程式を常に正確に解くことができれば、エネルギーの発生・制御から利用、安全性に至るまでに関連する流体力学的諸課題はほぼ解決する。しかしながら、同じ連続体近似としての流体现象においても、コルモゴロフの乱流スケールに代表されるような局所瞬時的な現象と、流路を流れる大局的な流れとの間にも、ミクロとマクロとの間のギャップと同様な階層的なギャップが存在する。連続体力学の世界においても、局所瞬時場の現象と、空間・時間平均場における大局的な熱流動の現象とを結合する手法、すなわちモデリングが極めて重要な課題として現在でもある。現在の、また次世代スパコンを以てしても、流体の局所瞬時の現象、とくに乱流の微細構造を解明するのは至難の業である。勿論、80年代、90年代のスパコンを用いていたころに比べると、乱流シミュレーションの進歩は隔世の感があるが。

個々の階層における個々の計算量自体が膨大である以上、これらの階層の計算を総合化する意味でも次世代スパコンへの需要と要求は限りを知らない。

しかし、そうしたシミュレーションの実現のためには、従来個別要素的に開発されてきた、シミュレーションモデルを相互に連結するための新たな計算手法を、最新の数理情報研究の成果に基づいて開発する必要があることが指摘されている¹⁾。

また、これまで独立して進められてきた多様なシミュレーション研究の成果を相互に活用し、質的に新しい枠組みに進化させる試みも不可欠である。このためには、組織や分野を超えたシミュレーション科学技術の学際的融合領域を確立することが極めて重要な役割を果たすであろう。

このようなミクロとマクロ、局所瞬時場と空間・時間平均場の関係を見据えた視点は、理学と工学の関係に繋がっていく。一般的に言って、理学は演繹的、ミクロ、真理追究というキーワード、工学は経験論的、マクロ、応用重視というキーワードで特徴づけられるであろう。これまで工学分野においては物づくりが強調され、必ずしも原理や現象の解明が100%なされていなくても、安全尤度や設計マージンといった比較的定性的な概念を提案することで安心感をもたらすような製品設計が可能であった。基本的には応用の学問であり、理学に比べてきわめて経験論的な部分が多い。事実、物理学の基礎方程式だけで設計できる製品は、いまなお、ほとんど存在しない。しかしながら、安全性の定量化とさらなる向上、安全性への要求とは一見相反する可能性があるコスト低減への厳しい要求は、こうした設計尤度の合理化、設計マージンの定量化要求となって、これまでの工学設計の在り方を根底から覆しつつあるのも事実である。また、近年、工学の諸分野の境界が薄くなるとともに工学と理学の手法上の境界も薄くなっている。また理論研究と実験研究の間の壁を取り払われてきている。計算科学技術の発展は、これら研究アプローチのあり方に大きな影響を与えるとともに、アプローチや方法論の壁を無くす役割を果たしている。

電子計算機と計算科学技術は原子力とともに発展してきたといっても過言ではない。原子力と電子計算機との最初の出会いは、1945年11月～46年2月ENIACを用いた熱核融合の計算にあるといわれる。この後、臨界実験装置を用いた実験、核反応断面積の測定やモンテカルロ法の考案に始まる中性子の挙動解析を始めとして、米国ロスアラモス、ローレンスリバモア、アルゴンヌ、ブルックヘブン、オークリッジ等の国立研究所での原子力研究開発に伴う計算のニーズと政府による予算措置が、科学計算技術のハードとソフトの発展の原動力となった。数値流体力学は1950年代から60年代にかけて爆縮シミュレーションのニーズのあったロスアラモス研究所で大きく発展した。また、その後、アポロ計画など宇宙開発に伴う資金がさらにその発展をもたらしたことはよく知られている。Boeing 777の設計や747の設計改良など、航空機の開発においてはすでに数値風洞や機体の構造計算は不可欠なものになっている。そこで実践される、CAD/CAMなどと組み合わせた計算によるシミュレーションによって工学機器の設計を行うSimulation-Based Design 手法

(Design by Analysis) などは、こうした計算機と計算科学技術の発展に裏付けられて実用化されてきた。とくに单相乱流の計算は実用の域に達していると考えられ、タービンや水車の翼の3次元での最適化を可能にし、性能や効率の向上をもたらしている。日本のエネルギー産業を代表する原子力分野においても、こうした科学技術計算の潮流を形作ってきたのであり、現在の地球シミュレータやさらにその先の計画の大きい礎となっている。

(2) 計算科学技術

① 計算科学と計算科学技術

計算科学または計算科学技術ということばが使われはじめてから久しい。ただし、計算科学技術というのは必ずしも正鵠を射た用語ではない。確かに私達は「科学技術」を科学と技術の二つの異なる分野を包含する言葉として何の抵抗も無く使っている。しかも科学技術ということば自体は定着し、殆どの国語辞典にも記載されている。しかしながら、「科学と技術は全く別個のもので、科

学技術ということばのように一緒くたにしてはいけない。本来、科学・技術と記さなくてはならない」という意見もある²⁾。科学は科学で技術ではないのであるが、科学という技術があればそれを科学技術と呼んでもよい。しかし、実際にはそのようなものはない、というのである。このようにいうと「計算科学技術」という用語はあらためて物議を醸すことになるが、ここでは“計算の科学・技術, 計算による科学・技術”をまとめて計算科学技術と呼ぶこととし、まず計算科学から話を進めるものとする。

② 計算科学の特徴

計算科学ということばが頻繁に使われ始めたのは 20 年ほど前である。その計算科学の揺籃期、次の両者が数値解析ということばで包含されていた。

(ア) 数値的手法そのものの研究・開発・評価

(イ) 数値的手法による諸現象の解析

数値解析の前半部 (ア) に 関しては、現象を記述する支配方程式の数値解をより容易に得るために行う式の近似や仮定の導入、数値的に解くべきその方程式の離散化、その離散化による誤差の最小化 (つまり高精度化)、ベクトル化、並列化、数値的な不安定性の除去、行列解法的高速化などが挙げられる。基本的には応用数学、物理数学、数値解析などに分類されるものであり、これらは大学学部、大学院レベルでの講義でカバーされるような内容である。最新情報については原子力学会誌連載講座で分かり易く解説されている³⁾。

(イ) の分野は、計算機性能の格段の向上に伴う計算資源の増大につれ、次第に計算力学、計算物理学、計算化学など、独立な現場の諸科学となり、それらの総称として「計算科学」と呼ばれるに至った。例えば、物理学を敢えて理論物理と実験物理に区別したとしよう。そうすると、道具としての計算物理が第三の物理として登場してきたことになる。そこでは現象の計算機シミュレーションが計算物理学の大きな柱となった。現象を理解するのに、実験、理論の他に計算科学という独立の学問の方法ができた、といえる。当然ながら(ロ)の現場から生じる新しい問題が(イ)の分野の研究の発展のさらなる原動力となる。結局、(イ)、(ロ)を総合して「計算科学」と呼ぶことになり、現在に至っている。

計算科学の特徴の一つは、計算が膨大であること、つまり計算出力量も膨大になることである。そのため計算結果の可視化という分野が重要且つ不可避である。計算科学においては、人間ができないことを計算機にやらせているのであり、それが本当に役立つことに使われるときに、あくまで人間がコントロールする、人間のための学問である。その意味でもこの可視化というのは、人間が判断を誤らないようにするための学問としても、今後発展が期待される分野である。例えば、計算結果の可視化は、熱流動の分野でいえば、実際に装置を用いて行う実験において、流況を可視化することに対応する。

一方、可視化というのは人間の視覚に訴える手法であり、実際に人間が見た結果の情報処理には主観が避けられないのも事実である。こうした主観的な情報処理に加え、膨大な計算結果の中から本質的かつ重要な情報を的確に抽出し、現象を支配する機構(メカニズム)を把握する客観的なアプローチが重要となってきた。パターン認識の分野で提案された POD (Proper Orthogonal Decomposition)⁴⁾ など、その典型例である。実験の場合は可視化だけでなく、実際にレーザードップラーやホットワイヤアネモメトリなどの原理を用いて乱流統計量や平均量を計測する。計算においては、これらの計測量が計算の結果として自動的に取得されるが、さらに POD など乱流現象に関わる本質的な物

理量分布を迅速にかつ客観的に分析することが可能となり、計算科学の大きな利点がここで強調される。

計算科学的手法の典型例としては、法則に従って記述された支配方程式を、いかなる妥協を排して直接数値的に解くことが挙げられる。これを直接シミュレーションと称する。物理モデルの導入や近似を行わないほど、或いは最小限に抑えられたものほど、その計算結果の質は、離散化と離散化以降の解法上の手続きに依存することになる。このような場合、誤差解析などを通じて、計算結果の品質保証をはかることが、おそらく計算科学の最も中心的な課題であろう。

③ 計算科学と計算科学技術の役割

計算科学が現象解明に用いられる科学の方法のみでなく、工学的装置やプラントの設計、性能や安全性の評価に有効に使われるようになって、計算科学技術が総合科学・技術の一環として捉えられることになるであろう。ここで「有効に」という意味は、計算科学が設計や安全性評価に、そのまま直接用いられる訳ではない。むしろ、間接的或いは補助的にでも、評価の対象となる現象の理解や、設計手法に実用に供される近似解法（所謂設計コードや安全解析コード）の物理モデルや構成方程式のベースになるデータを提供する手立てとして有効に活用されるという意味である。計算科学的手法の中には既に同等の役割を果たしているものもある。また構造解析における有限要素法、原子炉内の中性子束分布計算にボルツマン輸送方程式を解く Monte Carlo 法など、設計にそのまま用いられるものもある。これらは、適切な利用を行えば、基本的に定常計算に限れば略完璧な結果を提供するといってもよいだろう。しかしながら時間依存で 3 次元の現象である熱流動現象、化学反応や複合現象などについては、まだ完璧と呼ばれるには至っていない。工学的なモデリングを行う必要がある場合には相応の実験データを取得する必要があるが、直接シミュレーションを行うには計算機資源の不足が叫ばれる。地球シミュレータなどの利用により乱流の直接シミュレーションも $10^9 \sim 10^{10}$ メッシュの計算が可能になりつつあるが、まだ理想には程遠い。したがって、理想には程遠いが、これらの大規模計算の目指すところの第一歩は、計算科学によって部分的にでも自然現象を計算機の中に再現することであるといえよう。

前節でも述べたように、プラント設計、原子炉設計などで **Simulation-Based Design** とか **Design-by-Analysis** という言葉がよく使われる。ここでいう **Analysis** とは計算機によるシミュレーションであり解析である。しかし現時点では、必ずしも計算科学的手法を前提としているわけではない。例えば原子炉炉心燃料集合体内の冷却材熱流動解析を行う際によく用いられるサブチャネル解析では、計算メッシュが現象の代表長さを大きく超えるような固定のサイズである場合、現象のモデル化を必要としている。設計や安全解析では、こうしたサブチャネル解析手法の利用が前提となっている。それは現象のモデル化が実験データに基づくからであり、今現在、CFD によるシミュレーションよりは信頼性が高いとみなされているからである。また、計算科学的手法が簡便に計算結果を提供できるほどの計算機資源にアクセスできるわけではないためでもある。近い将来、計算科学的手法が実験と同等な質のデータを提供できるようになれば、**Design-by-Analysis** の前提は計算科学となるであろう。この場合は、反応器や熱交換器、原子炉などの中で生じている物理、化学現象を計算機で再現・分析するのみでなく、明らかに現在の計算科学の枠をさらに飛び越えて、装置の性能保証や限界を把握することに計算機シミュレーションが用いられることになる。これ

らは、計算科学技術発展の重要な方向付けとあってよいであろう。

現実の運転条件を遥かに外れた事故条件下における原子炉の挙動などのシミュレーションを非現実系のシミュレーションと呼ぶ。この非現実系のシミュレーションを含め、原子炉工学においては今後益々計算科学の手法への依存度が高くなることが十分予想される。このような展望が実現されるためには、ハイエンドコンピュータ性能の格段の向上、その性能を十分使いこなすソフトと、何よりも人の存在が重要となる。

④ 計算科学技術の品質保証

前節(2)②の最後に述べたように、計算科学における計算結果の品質保証は、あくまで離散化と離散化以降の解法上の手続きに依存して、誤差解析などを通じてなされるべきものであろう。その他の要素が品質保証に考慮されなければならないとすれば、計算科学という定義から外れてしまうことになる。

工学的設備設計や安全解析に用いられる近似的手法を含む計算科学技術の場合、計算結果の品質保証は、一般的には単なる誤差解析のみでは不十分であり、シミュレーションの対象とする現象のモデル化まで遡ることが必要である。離散化の一つである差分の場合について、少し専門的になるが、以下に例を挙げてみる。

数値流体力学(CFD)などでは、連続体の方程式を差分近似した時点で方程式の性格が本質的に変わることには注意すべきである。とくに差分方程式の差分量を無限にゼロに近づけたときに求まる偏微分方程式を原方程式と比較して見ると、余分な数値的な拡散項が加わっていることがある。こういった類の擬似的な付加項を明らかにして示すことが常に要求される。また、空間差分、時間差分とは、有限空間体積(空間メッシュ)、有限時間間隔での物理量の空間・時間積分平均操作を行うことである。従って、着目する計算メッシュ内での局所・瞬時物理量の空間分布とその時間変動などの情報は、この平均化の操作で全て喪失されることになる。その代わり、これら局所・瞬時の各物理量の平均値からのずれの相関を平均量によって記述して与え、積分量に関する支配方程式系を“閉じる”ことが要求される。すなわち、このように系を閉じるために与えられる相関関係式は構成方程式と呼ばれ、現象のモデル化と密接に結びついている。これらの構成方程式は、空間メッシュのサイズと形状、時間間隔に依存し、決して普遍的に与えられるものではない。したがって、現象をモデル化する際に構成方程式が必要なシミュレーションでは、用いた計算コードが既に検証されているからといって、得られた計算結果を鵜呑みにしてはならないのである。

計算結果の品質保証では、どのようにして計算コードを検証するか、検証されたコードをどう用いるか、計算結果をどう評価するか等について、明確な指針が与えられなければならない。このような指針作成の試みは、米国 NRC や OECD/NEA などが中心となって実施されているが、日本原子力学会などにおいてもこのような指針作りが望まれるところである。とくに計算結果を原子力施設の許認可などに活用するケースも増加しており、品質保証がどのようになされているかを証明して示すことが重要となっている。

(3) 原子力工学と計算科学技術

原子力工学は計算機シミュレーションの発展を牽引してきたし、計算機シミュレーションなしには原子炉プラントの設計や安全性評価はあり得ない。しかし、この事実にも拘わらず、計算科学技術は原子力施設、中でも原子炉の設計においては補助的な手段に終始してきており、未だ計算科学や計算科学技術が入り込む余地が大きいのである。原子力は実証された技術に基づくのが基本だからである。

ここでは熱流動設計を例に取って説明すると、例えば設計相関式などは実験情報に基づく必要がある。したがって、この時点でCFDが入り込む余地は少ない。しかしながら、逆に言うと、将来、設計や規制の本質に入り込む余地も大きいと言い換えることもできる。実際、現在の設計相関式そのものの適用範囲を超える場合、とくに幾何形状の変更などに対する適用範囲からの外挿などを行いたい場合、計算科学的手法によって実験を部分的にでも代替できるようになってきた。こうした計算科学の活用を継続発展させることによって、将来的には、高価なモックアップ装置や実験装置の製作を不要とし、数値実験で代替することが期待できる。計算科学技術の重要な将来展望の一つである。

① 原子力工学における計算機シミュレーション

原子力工学における計算機シミュレーションはその歴史をたどると 1945 年 11 月から翌 46 年 2 月に ENIAC で行った熱核融合反応の計算に始まると考えられる。それ以降、臨界実験による核データ取得、核計算ライブラリーの整備、中性子輸送計算など、電子計算機の利用があって初めて可能であったし、また計算機の発展を促したことが伝えられている。その意味では、原子力工学の発展は電子計算機の発展の大きな原動力であったことに異論を挟む人はいないが、21 世紀初頭の現在の状況はどうであろうか。

計算機資源の限界をあまり意識する必要がなくなった最近、様々な産業の分野で頻繁に用いられるようになった設計手法に Simulation-Based Design というものがある。例えば Boeing 777 の設計に積極的に取り入れられた結果、飛行性能や安全性の一段の向上、コスト低減、乗客の利便性の向上をもたらしたという報告が Boeing 社のホームページをみても垣間見られる。しかしながら原子力の世界ではなかなかこうもいかない。

例えば原子炉熱設計の現場では、もともと、電子計算機による解析なしには何事も進まない。計算機の進歩につれて、計算機シミュレーションの利用は飛躍的に高まった。ただし、そうした利用の実態は、つい最近まで計算機シミュレーションはあくまで補助的な手段でしかなかったという注釈つきで、である。たしかに原子力工学の中での計算機シミュレーションは、なくてはならない手段となっており、またその利用頻度が高いことは事実である。それにも拘わらず、いざ燃料設計となると、実験データに基づかなくてはならないのは何故か。許認可や設計認証のプロセスでは常に実験を要求するのは何故か。

その鍵は、原子力技術が、超高信頼性、実証性、経験と実績に裏打ちされなければならない技術であること、また、そこでは実証された耐久性が要求されること、製品のライフサイクルが長いことなどで、これらを計算機シミュレーションによってどれくらい保証できるかが問われているのである。もしも計算機シミュレーションによってこれらを高い信頼度をもって保証することができなければ、計算機シミュレーション技術そのものが、開発側のみでなく規制側にも認証されない。また、その技術に拠って提案される革新的な技術までが採用され難い。こうした保守的と言ってもよい原子力技術の特徴が大きな壁になっていることである。ところが、さすがに保守的な体質の原子力の技術の世界においても、また近い将来のリスク情報に基づく規制の採用の動向からして、また、このところの既存のプラントのリプレース、第三世代プラス、第四世代の原子炉開発研究などの潮流からして、Simulation-Based Design の積極的な活用を行わざるを得ない時代に入っていることは疑いない。

図 5. 2 は、まだ概念設計段階における次世代型軽水炉 IRIS の Simulation-Based Design における CFD(Computational Fluid Dynamics)の応用

例である。図は、原子炉压力容器底部での冷却材の流れをシミュレーションし、設計上の課題を同定するとともに、課題を解決するのにやはり CFD を用いることで設計の効率化が図れることを示している⁵⁾。

近い将来、原子力分野では、真の意味で計算機シミュレーションが今まで以上に重要な位置を占めることになることは明らかである。このため、開発者や規制側など関係者の計算科学技術に対する理解と支援は勿論のこと、計算科学技術のあらゆる面でより一層の品質向上努力が求められる。

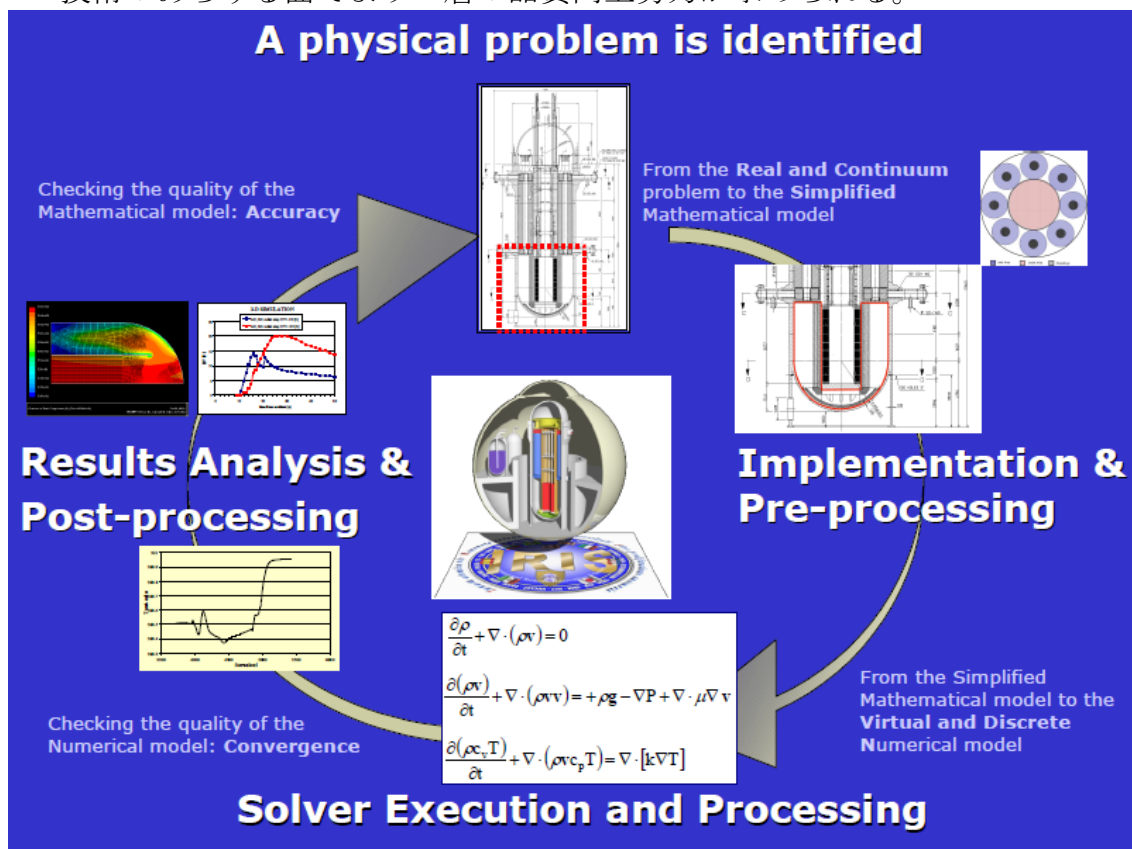


図 5. 2 CFD 応用手順

② シミュレーション応用の拡大

1 節では、計算機シミュレーションはまだ十二分に活用されていないと述べた。むしろまだ計算機シミュレーションの高いポテンシャルが、設計や安全評価の場で十分に活用されていない、というのが正確かもしれない。なお、この高いポテンシャルを確かなものにするためには、原子力技術者一人で原子力工学、中でも原子力の安全性に関する専門知識は勿論のこと、数値解析・熱流動実験・解析のいずれかの専門家を兼ねることが望まれる。すべてを一人で兼ねることが困難でも、少なくとも複数分野の専門知識を持った人間が原子力工学の場合に求められる。

実際の原子力の設計や安全研究の現場では、計算科学そのものからは程遠いとはいうものの、計算科学に依拠しなければならない工学的近似に基づく集中定数系の解析コードが主流である。その原子炉熱流動解析の代表にはサブチャネル解析というものがある。サブチャネルとは燃料棒に囲まれた最小の流路単位のことである。図 5. 3 に三角配列格子の場合サブチャネルを示す。サブチャネルの中に実戦で示したのは、理想的な無限配列の場合の平均場における最大対称流路で、この場合実線は幾何学的対称の線とゼロせん断応力または温度勾配がゼロの線と一致することを示している。サブチャネル解析では計算の分

解能が集合体内部のサブチャネルを単位とするメッシュサイズであるから相当粗い。これに対し図5. 3右はCFDにおけるメッシュ図の一例を比較として示す。

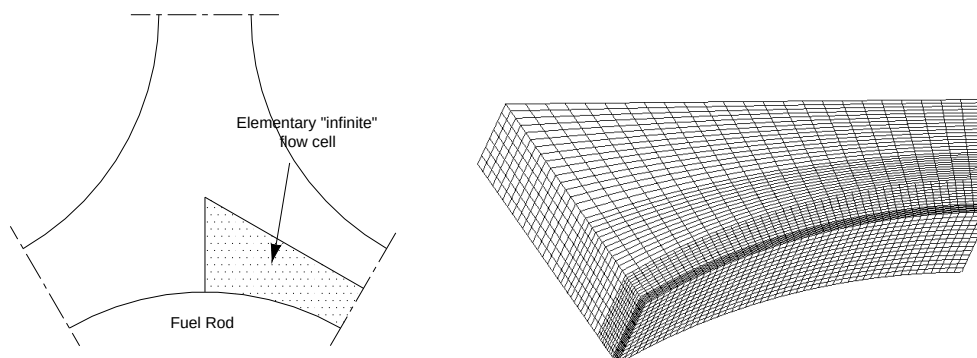


図5. 3 サブチャネル(左)と対称流路におけるCFDメッシュ分割図(右)

サブチャネル内に分布している物理量は全てそのサブチャネル体積内の平均量として一点に集中定数化されて扱われる。その結果、沸騰二相流の計算など、デスクトップPCでも時間はかかるが可能である程、比較的軽便である。しかしながら、このような集中定数系の解析コードでは、方程式系を閉じるための構成方程式が重要である。基本的な熱流動現象が分かっている必要があって、その現象を(構成方程式として)予めモデル化してコードに組み込んでおく必要がある。言い換えれば、計算対象は、モデル化を行った現象が発現する条件の範囲内に限られるし、範囲を外れての計算の妥当性は保証されない。また既知の現象の複合などについて計算を行うもので、当然ながらモデル化には未知の要素は組み込まれない。それでも設計に用いる解析手法としては、使い方を間違えないでという前提において、サブチャネル解析が最も信頼されている。その理由は、構成方程式というモデル化が実験に基づいてなされるからである。この場合、モデル化には機構論的なモデリングが要求されることに変わりはない。また、メッシュ(コントロールボリューム)に自由度はなく固定されているので、構成方程式はメッシュ依存ではあるが一旦確定したら変更する必要はない。

サブチャネル解析を近いうちにとって代わると期待される Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) 方程式を解く CFD も、既知の乱流現象についてモデル化がなされている。したがって未知の乱流現象は直接シミュレーション(DNS)、改善の手段として大渦シミュレーション(LES)で解明するしかない。したがって、これらの解析コードはお互いに相補関係にある。最近の研究成果としては、これまで実験的には報告されてきたが、そのメカニズムが不明であったり、または計算で再現できなかった、偏心円環内流路や稠密配列格子燃料集合体内流路を流れる低 Re 乱流にみられる局所層流化とグローバルパルセーション現象などがあり⁶⁾、これらの成果は地球シミュレータなどのスーパーコンピュータの利用によって初めて得られたものである。

原子力の安全性評価には決定論的手法と確率論的評価手法がある。前者は特定の原子炉プラントに対し、過渡や事故発生の仮定を行うものであるから、影響の最も大きな事故推移を解析することが要求される。この場合、事故の発生確率に関係なく、プラントの安全機能が余裕をもって発揮されることを解析や実験で証明することになるので、評価対象の数は限られる。これに対し、後者、すなわち確率論的手法においては、安全性に影響を与える可能性がある事象推移について発生確率を考慮しつつ解析を行う必要があるため、たとえ低頻度事象であっても事故影響が大きい場合も含め、決定論的なアプローチと比較すると、評価すべき

事象のスペクトルが広がる。米国やわが国ではこの確率論的評価手法が暫時導入されていくことになっており、趨勢としては他の国においても同様であることが予想され、従って、計算機シミュレーションの実施ケースが急増することが予想される。このことは、計算機シミュレーションがこれらの要求に応えるためには、規制側からの品質保証要求が明確に示されなければならないことにつながる。同時に、学会等の標準として、設計コード、現象理解のための解析コード、安全解析コードなど用途に応じた解析コードの品質保証基準などを策定する必要がある。

(4) 核融合研究への応用例

核融合は人類の究極のエネルギーと言われている。現在国際熱核融合実験炉 ITER 計画が進行中であるが、今世紀中葉までに実用化するにはさらに 2 段階の研究開発が必要とされている。その計画をより確実なものにするためには、核融合炉の“丸ごとシミュレーション”の実現が期待される。本章では、核融合エネルギー開発の関わる計算機科学技術の現状と展望をとりまとめた。

核融合研究関連の大型シミュレーションの現状と課題を、(1) 磁気閉じ込め核融合シミュレーション、(2) レーザー核融合シミュレーション に関し、スーパーコンピュータによる模擬実験の重要性と、より高精度の計算、大規模多階層計算の必要性を中心にまとめた。

① 磁気閉じ込め核融合の統合シミュレーション

燃焼プラズマの実現を目指したトカマク型核融合装置である ITER (国際熱核融合炉) では、主半径が 6m 程度のドーナツ形状をした真空容器に 1 億度のプラズマを定常的に閉じ込めることによって核融合反応を起こさせ、発生する高エネルギーのアルファ粒子による自己加熱により 1000 秒に及ぶ燃焼状態を実現する。実験を効率的に推進するためには、このような燃焼状態にあるプラズマの挙動を高精度で予測するとともに、それに基づいて閉じ込め性能のより高いプラズマ実現の指針を得ることが重要な課題になる。

このような ITER に代表される核融合プラズマは「複合的な物理過程における様々な時空間スケールで特徴付けられる階層間相互作用の結果としてその時空間的全体像が決定される開放系」として特徴付けられる。環状系磁場閉じ込め核融合プラズマのシミュレーション研究の目的は、実験及び理論との連携の下に、このような核融合プラズマの閉じ込め物理機構の解明及びその体系化(学術的視点)を目指すと共に、実験に先行して核融合プラズマを核融合炉システムの一部として評価(工学的視点)できる水準の‘核融合プラズマシミュレータ’を開発することである。磁場閉じ込め核融合研究におけるシミュレーション研究の学術的価値を明確化すると共に、環状系磁場閉じ込め核融合プラズマ実験に対して予測性を持つ先進的なシミュレーションコードを開発し核融合炉の開発研究に資するための活動が、相互連携研究を基本として、全国の大学及び研究所等で推進されている。

平成 19 年 10 月 24 日には、ITER 協定も正式調印されて本格的な建設活動に着手し、また、核融合科学研究所においては LHD 実験における DD 実験が、日本原子力研究開発機構では ITER-BA の一環として JT-60U を改良しての JT-60SA 実験が予定されている。このような実験研究を効率的・効果的に行うためには、実験に先行して磁場配位や外部からの加熱・電流駆動・回転制御・粒子供給等の最適化を評価でき、実験の予測、実験シナリオの策定等に貢献できるような、高水準の予測性を持つシミュレーションコードの開発が急務である。このようなシミュレーションにおいては、外部からの制御に対する巨視的実験観測量の

全時間的振る舞いを迅速に予測することに重点が置かれるため、現時点では、輸送シミュレーションをベースとして、外的要因に対する様々な階層でのプラズマ応答が比較的単純な理論モデルによって統合された階層統合型のシミュレーションコード（統合輸送コード等と呼ばれるが、以下では、「階層統合シミュレーションコード」と呼ぶ）が適している。

ITER 及び ITER-BA においては、国際協調を進めつつも、厳しい国際競争の中で、世界的に通用し、世界標準となり得る水準を有する様々なシミュレーションコード群の開発が、1) 個別物理過程を解釈・予測できる階層拡張シミュレーションと2) 実験シナリオを策定できる予測性を持つ階層統合シミュレーションの両者において求められているといえる。

上記のような背景の下で核融合プラズマの全体的振る舞いを予測できるシミュレーションを実現するためには、国内外の大学や研究所等との共同研究に基づき、実験及び理論とも密接に連携しつつ、巨視的な実験観測量の時間発展解析を基本とし実験シナリオ策定に適した階層統合シミュレーションを用いたアプローチと、階層間及び複合物理間の相互作用の解析を基本とし基本物理過程の探求に適した階層拡張シミュレーションを用いたアプローチの両者を同時に推進する必要がある。更にこれらと平行して、階層拡張シミュレーションの知見を、理論モデル、数値データベース、モジュール等として階層統合シミュレーションへと取り込む数値的繰り込みモデルを段階的に開発することにより、階層統合シミュレーションの予測精度の向上を図り、最終的には、磁場閉じ込め核融合炉システムの設計に中心的役割を果たすシミュレーションコードの開発を目指すことも必要である。例えば、核融合科学研究所においては、上記の構想に基づき、実験に先行して核融合プラズマを核融合炉システムの一部として評価できる水準の‘核融合プラズマシミュレータ’として‘LHD 数値試験炉’の開発を進めている。

これまで核融合研究は、日本原子力研究開発機構（JAEA）の JT60 に代表されるトカマク型装置や核融合科学研究所（NIFS）の大型ヘリカル装置（LHD）に代表されるヘリカル型装置をはじめ、国内外の様々な核融合実験装置による詳細な実験データベースとともに、理論やシミュレーション研究に基づく多種・多様な知見に基づいて ITER を設計し、燃焼プラズマを実現するに至っている。一方、将来の核融合プラントを念頭に置くと、他の様々なエネルギー源に対して高い競争力を維持する必要があるため、ITER と比べてさらに高いエネルギー密度を持った低コストで高効率の燃焼プラズマを実現することが不可欠である。高い予測精度を持つ階層拡張シミュレーションや階層統合シミュレーションが京速コンピュータやさらに次世代の高性能コンピュータにより実現し、このようなシミュレーションモデルの有効性が ITER や LHD 等の関連するプラズマ実験との比較により十分確認できれば、一基 1 兆円の実証炉段階を越えて、一気に高効率で高い競争力を持った商用炉の設計と建設に進む事も不可能ではない。（図 5. 4）

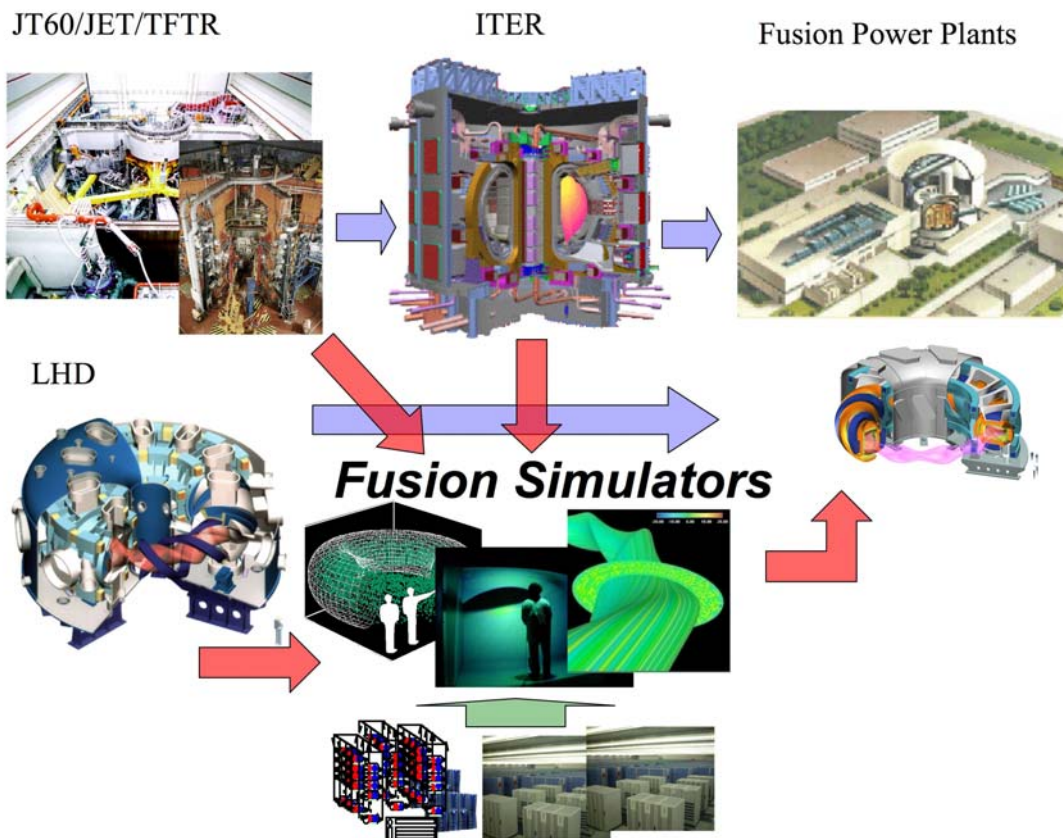


図 5. 4 核融合炉の開発戦略

② レーザー核融合の統合シミュレーション

欧米，中国，日本で大型レーザー実験施設による精力的な研究が進められている。特に近年，超高強度レーザーの大型化により実現した高速点火方式のレーザー核融合に注目が集まり，これを軸として我が国のレーザー核融合研究は大きな進歩を遂げている。高速点火方式では，超高強度レーザーを使って大量の高エネルギー電子を発生させ，これを圧縮された燃料に注入することで核燃焼点火をアシストする。従来のレーザー核融合では燃料ペレットの圧縮と点火に必要な加熱を同時に起こす必要があるため，高い燃料圧力に逆らって圧縮するだけのレーザーエネルギーが必要であった。

これに対し，高速点火方式では，十分に圧縮された燃料に短時間の追加熱をして燃料の一部を点火し，燃焼を開始させる。その際の内部圧力は低くてもよいので，トータルなレーザーエネルギーが格段に少なくてすむことになる。超高強度レーザーの出現によりこの高速点火型レーザー核融合が実現可能になった。高速点火型レーザー核融合においては長い時間をかけて生成される「爆縮プラズマ」，超短時間で局所的に起こる「電子ビーム発生と伝播」，最後に爆縮コアプラズマで起こる「エネルギー付与」というように，時間・空間領域を分離し，それぞれの領域をそれぞれの長所を生かしたコードで解析し，必要な情報を必要に応じて交換する“分散型の丸ごとレーザー核融合シミュレーション”が構想されている。この連結型のシミュレーションシステムでのデータのやりとりは，独自に開発したネットワークプロトコルを用いて，異なるアーキテクチャ，例えばスーパーコンピュータとパソコン，の間でもインターネッ

ト経由のデータ転送が考えられている。また、スーパーコンピュータの利用においても、PIC コード向きの超並列コンピュータと流体コード向きのベクトルコンピュータをつないでデータ転送する可能性も考えられている。

(5) その他のエネルギー開発と計算科学技術

原子力による我が国のエネルギー問題に対する計算科学技術の確立は、最も期待される分野であると同時に、地球温暖化問題への対処として叫ばれている mitigation, adaptation, geo-engineering に観点をおいた、その他のエネルギー開発も、シミュレーション技術の開発と計算科学の発達によるところが大きい再生可能エネルギーに位置づけられる太陽エネルギー、風力発電、バイオマス、水力、地熱エネルギーなど、いずれのエネルギー開発においても、計算科学に立脚したシミュレーション技術の開発が不可欠である。

太陽エネルギーにおいては、機器単体の性能評価プログラムと設置地域を配慮した年間集熱量算出プログラムを構成し、シミュレーション結果を設計から営業活動まで幅広く活用可能なプロセス技術開発を支援するシミュレータ、物の屋上、外壁面等、様々な部位に設置が可能な太陽電池の、太陽電池容量、設置地域、設置方位、設置角度により変化する発電量をシミュレーションする太陽光発電シミュレータ、太陽光発電システムの物理現象を詳細に模擬するモデルの開発やおよび統計モデルの開発を含めた太陽光の閉じ込め構造解析シミュレータ、物の屋上、外壁面等、様々な部位に設置が可能な太陽電池の、太陽電池容量、設置地域、設置方位、設置角度により変化する発電量をシミュレーションする太陽光発電効率シミュレータ、デバイスシミュレーションを用いた素子の電流電圧特性の解析などが、効率よい発電を支える技術として開発が進められており、その必要性や経済効果はもちろんのこと、社会的な高い要請を基盤として、積極的な研究開発が求められる課題である。

風力発電においては、我が国特有の地形や気象条件に合致した風力発電機を、設計基準から見直し、さらに気象と発電効率を連成させて効率的に風力発電を行うための研究開発が積極的に推進されている。台風や雷など、日本に特有な気象の特性を考慮した設計基準の必要性、あるいは、風力電力の安定供給のためには、少なくとも3日先までの発電予測とそれに伴う発電コントロールの必要性があること、などの、従来から要請されている課題が非常に明確なことから、さらに具体的な計算科学の基づく技術開発が不可欠である。また、社会的な要請から、羽の形状と羽の後方渦、およびそれらの非定常かつマルチスケールなシミュレーションや、景観予測シミュレーションも大きな注目を集める技術であり、社会科学やデザイン科学などの分野との連携を積極的に考慮されるべき、あたらしい技術開発が求められる分野である。

加えて、最近非常に注目を集めているバイオマスエネルギー分野においては、社会的な要請と経済効果が注目されることから、既に一産業としての地位を確立しつつある。本分野においても、有機系廃棄物を含むバイオマス資源とそれらの再資源化施設の構築に際し、地理的、時間的偏在性を考慮した情報を収集、管理しながら管理サイクルを確立するためのシミュレーションとその管理システムの構築のための、バイオマス循環シミュレーションシステムを構築することが必要不可欠であることは、広く周知されている。

上記の新しいエネルギー開発においてのみならず、従来からのエネルギー開発である水力、火力、地熱エネルギー開発においても、気象や利用条件の急激な変化に対処するためのシミュレータの開発の重要性が指摘されている。水力エネルギーの賦存量・可採量予測シミュレーション、水力や火力機械の流体—物体シミュレーション

ュレーション、地熱流体の貯留層の変動を予測シミュレーション、貯留層の熱水流動の評価シミュレーションなどは、エネルギー開発を効率的に行うために必要不可欠なシミュレーション技術開発として位置づけられる。また、これらのシミュレーション技術の開発が、気候変動に対処するための mitigation, adaptation に対応することは論ずるまでもない。

今後、さらに気候変動に対処するための第 3 の立場である geo-engineering から、新たなエネルギー源を開発しゆく重要性と必要性も論じられることになるだろう。全地球的に進行する気候変動は、新たなエネルギー源を提供する可能性を秘めている。特に、自然環境における変動を利用した大気や海流、洋上の利用、増加した熱エネルギーを蓄熱利用する技術などは、シミュレーション技術の確立に伴って、劇的に開発が推進される可能性がある。新しいエネルギー源の開発においても、シミュレーション技術の発展が、そのキーポイントになることを指摘する。

(6) 大規模シミュレーションの社会的意義-産業界への広がり

① コンピュータ拠点の在り方

エネルギー科学分野では、プラズマや多相流等の複雑流体を利用する装置や複数の材料の組み合わせから発現する機能の予測や、望みの機能を持つデバイスの製造プロセス設計などにおいて、超大型コンピュータの利用の要望が高い。例えば、エネルギー関連の半導体デバイスは基本的に多層膜構造であり、その製膜法、界面特性、界面制御などが問題になる。これまでデバイス特性は、各々のデバイス構成材料ごとに物性を調べることにより議論されてきたが、デバイスが微細化し、界面領域が増大して、“界面だらけ”になったので、大規模計算でデバイスを丸ごとシミュレートし、従来法による結果との差異を確認したいという要望は、企業研究者の間にある。スーパーコンピュータを超並列で使うことの意義は、この辺にあると思われる。また、原子力発電所の安全管理の上においても予測性のある大規模統合シミュレーションに重要性はますます高まっており、スーパーコンピュータの利用の意義は大きい。

しかし、何度も繰り返し行なうことが困難な超大規模な計算では、産業への貢献には限界がある。また、大規模並列化のための作業（時間）も、特に企業にとっては障壁になる。

リソースの大半を同時に使用する必要がある大規模系のシミュレーションは、対象さえ誤らなければ、アピール度は強いので、この分野を牽引する上で重要である。しかし、産業応用としての課題は、パラメータ・サーベイ的な、同種多数のシミュレーション（時間をかければ、個々に分割して行うことが可能）を同時に行うものを多く含むと想像される。これらの中には、大量の計算に適した新たな計算手法の開発、同種多数のジョブの生成、投入、途中経過のモニタリング、大量のデータの効率的解析方法などの手法の開発に貢献できるものもあると思われる。将来技術への波及効果を見据えれば、これらの手法、ソフトウェアの開発も同時に望まれる。

② 技術支援体制、技術的課題の抽出

産業共用も視野に入れた大型計算機シミュレーション拠点形成が必要である。拠点では、利用プログラムのチューニングに大半の労力が費やされることのないよう、相談窓口を置くなど、技術支援体制を整えることが重要である。（将来的にはこの部分の負荷を減らさないと、産業応用への普及は期待できない。）また、ここで抽出された技術的課題は、次のコンピュータシステムやミドルウェア、結果解析ツールなどの開発のために公開されるべきである。これらの課

題解決のためには企業との協力が欠かせない。

③ 人材養成とスパコンの学術・産業界における広がり

産業界も含めスーパーコンピュータ利用がエネルギー・環境分野で広く活用されるためには、エネルギー分野密着がたのコンピュータ技術者の養成が重要である。すなわち、従来経験しなかった規模の大型コンピュータを十分活用するには、応用分野に密着したシミュレーション技術を発展させる事が不可欠である。そのためには専門分野にも習熟した計算機科学技術の専門家(CSE)、すなわち分野密着型次世代スパコン計算科学技術者を養成することが求められる。例えばエネルギー・環境専攻のカリキュラムでは、数理情報科学+計算機科学(シミュレーション技術)+流体力学, 原子核物理, プラズマ物理, 物性物理, 計算化学, 原子力工学, 等専門科学を一貫して習得出来る仕組みの構築が必要である。

次世代スパコンを利用する研究教育という観点から見れば、その人材出力は、必ずしも大学や研究所ばかりではなく、一般企業も視野に入れなければならない。次世代スパコンは、純粋科学にのみ供与されるものではない。シミュレーションによる解析精度の向上は、企業の製品開発に今後より積極的に利用されることが大いに予想される。翻って言えば企業との研究タイアップも重要な位置になればならないと同時に、企業研究者の育成も、本連携大学院構想の重要な使命の一つである。そこで、企業からの参加を積極的に呼びかけ、研究に限った参加だけではなく、所属する大学院学生に対して、企業の研究所で働くための心構え、企業倫理なども教育できるシステムの構築が需要である。

計算科学技術は広範なエネルギー科学分野において重要な方法論的存在となりつつあるとともに、その発展は、理学と工学、理論と実験、ミクロとマクロ、局所瞬時と平均場などの各階層の間のギャップを埋める役割を果たしつつある。また、近年、工学の諸分野の境界が薄くなるとともに、工学と理学の手法上の境界も薄くなっている。また理論研究と実験研究の間の壁を取り払われてきている。境界領域の拡大ともいえるが、むしろ計算科学技術の発展が、これら研究アプローチのあり方に大きな影響を与えると同時に、アプローチや方法論の壁を無くす役割を果たしているといえよう。

計算科学技術が原子力エネルギー利用において果たす工学的な役割には、設計開発の迅速化、合理化などコスト低減と、安全性の向上に繋がるものがある。近年の安全性の定量化とさらなる安全性向上などの要求と、同時に一見相反する可能性があるコスト低減への厳しい要求に対し、設計尤度の合理化、設計マージンの定量化などをSimulation-Based Designによって実施することの可能性を追求するなど、これまでの経験論的な工学設計の在り方を根底から覆しつつあるのも事実である。

計算科学の発展のキーワードは連携といわれる。分野間の連携、協力体制は大丈夫か。問題を持っている人、解法を持っている人、コード開発者、数学者、計算機設計者・開発者との連携。例えば、ハイエンドなコンピュータになると、計算に用いるアルゴリズムが制約を受けるケースがよくある⁷⁾。そのような場合、アプリケーション開発者やその利用者が計算機のあるべき姿について計算機の開発者に要求を具体的に出していくことが重要である。そのためには利用者もアプリケーションの中身を熟知していなければならない。とくに、今後のスーパーコンピュータは数万規模の並列度を持つシステムになる可能性が高く、これに対処するためには計算コードの再構成が必須となる⁸⁾。そうすると計算機的设计・開発者との連携が強く求められてくる。ここでも、基本に立ち返り、計算モデルの意味、コードの中身の把握が重要となる。

参考文献

- 1) 三間罔興：パブリックコメント本文（国際高等研究所多階層連結コンピューティングフォーラム，2008年1月）
- 2) 團藤重光（編）先学訪問 ～21世紀の皆さんへ～ 04, 社団法人 学士会 （2006）
- 3) 日本原子力学会計算科学技術部会 連載講座 計算科学手法と原子力分野における応用 第1回～第10回，日本原子力学会誌 Vol. 48, No. 4 (2006)～Vol. 49, No. 2 (2007)
- 4) J.L. Lumley, Stochastic tools in turbulence, Academic University Press (1970)
- 5) E. Colombo, F. Inzoli, et al., Computational fluid dynamics as a virtual facility for R&D in the iris project: an overview, Proc. 5th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids, Dubrovnik, Croatia, May 16-20, 2004.
- 6) H. Ninokata and E. Merzari, Computational Fluid Dynamics and simulation-based-design approach for tight lattice nuclear fuel pin subassemblies, *Keynote lecture*, KN#6, 12th Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-12), Pittsburgh, USA, October 1-5, 2007.
- 7) 中島, 連載講座 計算科学手法と原子力分野における応用 第9回 高速化技術（その2）, 本会誌 Vol. 48, No. 12 (2006), 961-966.
- 8) 横川, 連載講座 計算科学手法と原子力分野における応用 第8回 高速化技術（その1）, 本会誌 Vol. 48, No. 11 (2006), 877-880.
- 9) サステナビリティの科学的基礎に関する調査報告書, サステナビリティの科学的基礎に関する調査プロジェクト(2006).

6 分散型エネルギーシステム

(1) はじめに

低炭素社会への移行には、社会に適用可能なエネルギー技術および環境負荷低減技術の開発と国際的な発信が強く求められる。今後、エネルギー需要が急増する地域において環境制約が持続可能な成長を妨げないようにするには、利用サイドにおける高いエネルギー利用効率と共に、供給信頼度に優れたエネルギー供給体制を築いてきた日本のエネルギー・環境関連技術と社会制度を移転することが、わが国の最も重要な貢献のひとつに成り得るといえる。エネルギー技術やシステム化の恩恵を実現するためには、当該地域のエネルギー賦存状況や社会経済状況に適合した形で、分散型エネルギー資源を最大限活用することが有効な解決策のひとつである。わが国では、地域における環境問題の大半は緩和されてきたが、交通問題や質の低い燃料消費に伴う環境問題が、公共交通基盤整備の追いつかないアジア各国で住民の健康に深刻な影響を及ぼし、交通渋滞に伴う社会費用を増大させている実態がある¹⁾。

エネルギー生産・輸送・利用のクリーン化および自給率向上は、世界の持続可能な発展に不可欠であり、待ったなしの状況にある。広く国際社会に受容される形で実現可能な短期、長期のエネルギーシステム変革の姿を提示し、エネルギー分野における研究開発を着実に進める必要がある。

(2) エネルギー分野におけるイノベーションに向けて

わが国が、エネルギー分野での基礎研究の成果を社会的・経済的価値に具現化するイノベーションに結実させていくためには、まずこの分野の活力ある人材を育成し、そして長期的なエネルギービジョンに基づいて幅広い研究開発を継続し、エネルギーに関わる地球規模の課題に積極的にコミットしていく姿を国内外に強く発信していく必要がある。

現在、高経年化するエネルギー機器の使用やオペレータの技能不足など人材の問題がエネルギーの安定供給を脅かす状況が、米国等で大停電などの形で顕在化している²⁾。事業環境が変わっても、エネルギー産業に従事する人の教育・訓練費用を最適水準まで確保し、より少ない人数で複雑化する業務を遂行するための能力を維持することが、社会基盤であるエネルギーシステムを安定的に運用するために不可欠である。わが国でも、エネルギー価格を低位安定化するため、短期的に設備投資や維持管理費用を削減すれば、将来欧米で起きたような事態が懸念される状況にある。

20世紀にスケールメリットを求め続けて完成されたエネルギー需給構造にとって、エジソンの発電事業に改めて学ぶべきものが見つけられる。それは量産の経済性を追及する小規模分散のシステムであり、需要地近接性の高いマイクログリッドに代表される考え方である。燃料、電力、情報のネッ

トワークの融合が図れれば、個人や、小口ユーザーの近接地に多種多様のエネルギー輸送・変換・利用を可能にする未来システムが構築できることになる。集中と分散のベストミックスを達成する、統合化分散エネルギーシステムの実現には、新たな知の創造と体系化、構造化が必要である³⁾。

低炭素社会を実現する大きな柱は、需要サイドにおける IT を活用したエネルギー利用の高効率化、再生可能エネルギーの本格的な普及拡大、社会に受容される原子力利用の推進である。これらを統合的に実現するには、運転時にカーボンフリーな原子力や水力をベース電源とし、できる限り需要に近接した形態で電力、熱、水素等の二次エネルギーを供給し、センサーや情報通信技術を駆使して、きめ細かく需要を制御する自律分散型のエネルギー需給マネジメントシステムが構築される必要がある。

完全な脱炭素社会に移行するには、核融合発電や超電導技術などエネルギー分野で次世代技術の開発が不可欠であるが、これらが実際の排出削減につながるまで温暖化防止策を待てる状況にはない。脱炭素社会への移行期において、開発された技術を少しでも早く社会にとりいれるためには、従来の硬直的な需給体制ではなく、分散型エネルギー資源を活用した柔軟なエネルギー需給システム、すなわち、ホロニック・エネルギーシステム^{4)、5)}を構築することが有効である。

(3) ホロニック・エネルギーシステム

ホロニック・パスは、分散型エネルギーか大規模集中型エネルギーかの二者択一を迫る考え方ではなく、環境適応できる生命論的、両立的(dual)な哲学であり、方法論である。長期的には資源枯渇や環境制約からエネルギー需給体系を変える必要があることは明らかであるが、エネルギーユーザーが地球温暖化影響など環境外部性を内部化するエネルギー価格を受け入れ、かつ、新しい環境ビジネスやエネルギーサービスが経済を活性化し、雇用や生きがいにつながるような社会経済を描かなければならない。これを実現するひとつの途がホロニック・エネルギー社会である。

大規模集中システム中心のハードパス、小規模分散型システム中心のソフトパスを協調融合するホロニック・パスは、いわば適材適所の文明論的な考え方である。ホロニック・エネルギーシステムとは、自律的に構成、運用される分散型エネルギー資源(要素)が、要素間の相互作用と要素の変換によって進化し、全体として相互補完を図るようにネットワーク運用される姿と定義される。そのようなシステムの具体的な姿は、それ自体が今後の研究開発の主要課題ではあるが、例えば図 6.1 に示すようなマイクログリッドが提案され、試験運用、評価の段階にある。

ホロニックエネルギーシステムのイメージ

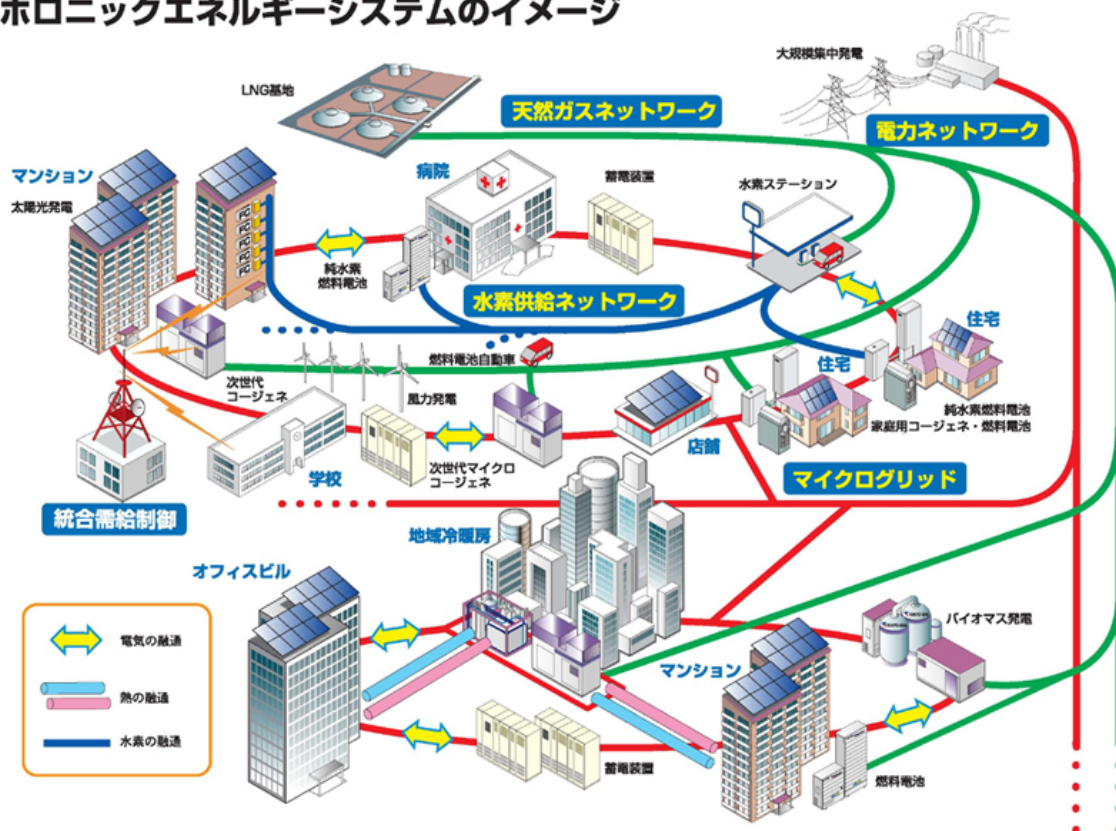


図 6.1 ホロニック・エネルギーシステムのイメージ⁵⁾

地域の需要や資源賦存状況に適合して、自律分散型エネルギーシステムが既存の電力系統や都市ガスネットワークと連携し、電力、熱に加えて需給の時間的・空間的ミスマッチを解消するため、水素の融通も可能とする構想である。需要家は環境負荷低減のほか、コージェネレーションを有効利用できれば、エネルギーの高効率化、エネルギーコストの削減が可能である。また、IT産業や半導体工場など電力品質に敏感な需要家は瞬時電圧低下対策として電力貯蔵や自家発電設備を設置する場合がある。エネルギー供給側にとってのメリットとして、大型電源に比べて、運転開始までのリードタイムが短く、競争導入や経済見通しが不透明な中、需要の不確実性への対応に分散エネルギー利用が有効と考えられる。

都市外から移入されるネットワークエネルギーと都市内で変換・流通する電力と熱が一体で利用されることによって、高効率の安定したエネルギーサービスが実現するものと想定される。また、バイオ燃料や水素、電力など新しい輸送用燃料も都市間・都市内などの用途や燃料の得失に応じて柔軟に導入される。エネルギー供給の選択肢を増やし、リスク分散を図ることが重要な視点である。

ホロニック・エネルギーシステムは、多様な分散型エネルギー資源をネットワーク運用し、適材適所で必要に応じた電力や熱を無駄なく活用でき、

環境負荷低減に寄与する。さらに、災害時や電力系統事故時にはある程度の負荷（防災用、非常用など）を自立供給可能とし、分散型資源と大規模ネットワークエネルギーが互いに助け合う形に発展させる。

地方都市等では後背地の緑を活用し、エネルギーの地産地消も考えられ、環境共生型社会の構築にも寄与する。マンション、オフィスビル、店舗、都市周辺の農地等がエネルギー供給の主体にもなるため、新技術による新ビジネスの創出を誘発する可能性がある。

住宅に設置したPVはもとより、グリーン電力ファンドなど自主的な取り組みによる市民風力の建設など住民のエネルギー供給へのアクセスが身近になり、エネルギー問題・環境問題を自らの問題としてとらえ、行動する意識が高まる。

大幅なエネルギー利用効率改善技術と、自然エネルギーも含めた多様なエネルギー資源の利活用技術が浸透する結果、特定のエネルギー資源に過度に依存することがなくなり、エネルギーセキュリティが向上する。職住近接など用途混合が進むと同時に、学校など防災拠点を含む単位で街区が形成され、街区単位で化石燃料消費やCO₂排出を最小化するエネルギーマネジメントが行われる。街区内の建物間ではエネルギーを相互に融通し合うことで、エネルギー利用効率が向上する。エネルギー・資源制約や温室効果ガスの排出削減への具体策が浸透し、将来のエネルギー供給に対する不安が軽減し、ヒートアイランドなど都市の熱環境問題を緩和し、健康影響を防ぐ。あらゆる製品のリサイクル技術が普及し、都市への資源・エネルギー投入量が大幅に減少し、大規模な廃棄物処理場が不要となる。国内バイオマス資源の利活用技術が確立し、休耕田や間伐材の利活用が進展し、農山村でのエネルギー生産が拡大する。

自律分散型のエネルギーシステムを形成することにより、地域内のエネルギー利用効率とエネルギー自給率を高める。また、エネルギー供給の多重化や予備電源の設置、エネルギー貯蔵により自然災害時における大規模な供給遮断リスクが軽減し、万一遮断した際も、容易に復旧可能となる。

(4) 主要な研究課題

上記ホロニック・エネルギーシステムを実現するための主要な研究課題を以下にあげる。コスト増加を許容すれば、現状の要素技術を用いることによって、エネルギー消費・環境負荷削減効果を実現できる。都市構造の変革や生活様式の変化を伴うもの、あるいはバッテリーなど技術のブレークスルーがないと広く普及しにくいものなど、長期的に実現される技術課題もある。国外も含めると、それらの研究開発の成果は、21世紀中葉まで段階的に適用、普及していくことになる。

① 高効率化技術、低環境負荷技術

各種燃料電池、エンジンやタービン発電機によるコージェネレーショ

ンシステム、空調・給湯・産業用ヒートポンプシステムなど要素技術の一層の効率向上や環境性改善をめざす研究開発は、エネルギー分野のイノベーションの基礎となる。発電効率が70%を超える燃料電池・熱機関ハイブリッドなどに期待が大きい⁶⁾。また、太陽光発電(PV)の低コスト化や高効率化技術、わが国の自然環境に適合する風力発電(洋上を含む)、小規模分散型バイオマス発電・熱利用技術、ハイブリッド型太陽熱利用技術などは、脱炭素化と同時にエネルギー自給率の面からも高いポテンシャルを有していると言える。

② 2次電池などエネルギー貯蔵技術

携帯機器や自動車用に高性能の2次電池が開発、商品化されつつある。現在の数倍のエネルギー密度をもちながら、数分の1のコストに低下すると、ユビキタスエネルギー供給可能になる。また、PVや風力など自然変動電源を大規模に導入するために電池に限らず、電気二重層キャパシタ、蓄熱、水素貯蔵などエネルギー貯蔵技術の開発が鍵を握っている。

③ 電力・熱供給の小規模ネットワーク

複数の建物負荷に対して、統合制御された複数の分散型電源で電力や熱を供給する小規模ネットワークを、マイクログリッドと称する^{7),8)}。再生可能エネルギーと出力制御可能な分散型電源を組み合わせ、エリア内の自立度を高めることが可能となる。都市部における複数建物や既存地域冷暖房システムを連携する、エネルギーの面的利用も含まれる。地域エネルギー供給に占める自然変動電源の割合を高めるために必要な、エネルギー貯蔵容量の評価、最適化などの研究や、実運転やシミュレーションに基づく経済性、環境性の評価が必要となる。

④ ITを活用した需要反応技術とアンシラリーサービス供給

需要家のエネルギーマネジメントシステムと分散型電源、さらにスマートメーターを介して配電システムを連系し、需給両面で統合的に最経済あるいはエネルギー効率最大化できる運用方式を開発する。需要予測、経済運用、需要反応、品質別供給などエネルギーマネジメント方式の研究を含む。

マイクログリッドやマイクログリッド内の分散型電源や電力貯蔵装置が電力システムの異常時に、需要反応プログラムに参加して電力システムの周波数制御や予備力供給などのアンシラリーサービスを供給できるか可能性を探る。また、分散型資源がわが国で大量導入が期待されるPVなど間欠的な再生可能エネルギーが多数連系された地域で配電電圧制御に貢献できるかを研究する。

途上国では、電力供給基盤の整備にかかる多額の費用が経済発展の資金制約になると同時に、脱硫装置など環境対策の優先度が低く、火力発電所の建設・運用は真に必要な最小限にとどめることが必要である。需

要サイドのエネルギー利用高効率化や、需要反応プログラムの常時監視ネットワークができれば、ピークやミドル負荷対応の火力建設容量を削減することができ、持続的な経済発展に寄与する。

⑤ 再生可能エネルギー源の円滑な導入技術

大規模風力発電所やメガソーラーに、数 MW 以上の大規模電力貯蔵設備を併設する動きがあるが、本来、モジュール設置が有利なこれら分散型エネルギー資源を需要地に近接して導入できるマイクログリッドや、新しい能動的な配電技術の開発が必要である。また、マイクログリッド内の自然変動電源の比率を 50% 以上に高める制御技術も目標となる。

⑥ 自動車と電力システムの連携

現在開発中のプラグインハイブリッド自動車（PHEV）などバッテリーを搭載した自動車は、主として、夜間時間帯の CO2 排出原単位が比較的低く、安価な商用系統からの充電形態が想定されている。また、一般家庭に設置されている PV の多くは昼間在宅率の低い世帯も多く、商用系統に逆潮流され、将来、より多くの世帯に普及すると電圧制御など運用上の問題が懸念される。従って、マイクログリッド内に設置された自然変動電源の出力平滑化や環境負荷低減に寄与する自動車の充放電制御方法や、稼働率の低い自動車用バッテリーの高度利用方法を研究する必要がある。

(5) 日本からの新しいエネルギー需給モデルの発信

ホロニック・エネルギーシステム内の分散型エネルギー資源は、エネルギーネットワークを通して相互に助け合うのが理想的である。既存ルールの下でお互いに迷惑をかけないのが“良き市民(Good citizen)”としての振る舞いであれば、さらに一歩進めて、全体の秩序形成にも貢献できるように積極的に助け合う“模範市民(Model citizen)”として参加していくのが望ましい。日本の電力系統制御技術は、これまでの垂直統合一貫体制の中で完成度を高めてきた。これからは、自然災害はもちろんテロや市場化に伴う新しいリスクに柔軟に対応できるように、システムのさまざまな階層で多様性を活かせるエネルギーシステムのモデルを提示していく必要がある。多様な発展段階にある諸地域に適用可能な日本発のエネルギー需給マネジメントモデルを実証的に示すことにより、当該分野の将来の人材確保にも好影響が期待される。

参考文献

- 1) Yande Dai, 中国が直面しているエネルギー問題と持続可能なエネルギー戦略, エネルギー・資源, Vol. 27, No. 3, 2006, pp. 11-15.
- 2) 穴山悌三, 電力産業の経済学, NTT 出版, 2005, pp. 267-271.
- 3) 笠木伸英, エネルギー・リネッサンス-分散システムへの潮流-, コージェネレーション, Vol. 16, No. 1, 2001, pp. 7-11.

- 4) 浅野浩志, ホロニック・エネルギーシステム, 日本機械学会誌, Vol.108, No.1045, 2005, pp. 946-947.
- 5) 浅野浩志, 分散型エネルギー資源の社会的活用をめざすホロニックエネルギーシステム, コージェネレーション, Vol.23, No.1, 2008, pp. 113-117. 6) 笠木伸英, 君島真仁, ガスタービン・燃料電池ハイブリッドシステムの展望, エネルギー・資源, Vol. 23, No. 3, 2002, pp. 183-187.
- 7) Nikos Hatziargyriou, Hiroshi Asano, Reza Iravani and Chris Marnay, Microgrids for Distributed Generation, IEEE Power and Energy Magazine, July/August, 2007, pp. 78-94.
- 8) 浅野浩志, マイクログリッドの研究動向, エネルギー・資源, Vol.29, No.1, 2008, pp. 15-18.

7 結び

英国の「スターン報告」にも書かれているように、地球温暖化、環境問題を左右するエネルギー問題に関しては、早期の行動が求められている。この中で科学技術の役割はきわめて大きく、様々な専門を背景とする科学者が中立的な立場から議論し、行動することが求められている。

このような意味から、日本学術会議総合工学委員会（第 20 期）の下にエネルギーと科学技術分科会が設置され、これまで数回にわたって議論がなされてきた。本記録では関連する 5 つのテーマに関する議論の内容についてまとめた。ここで取り上げたそれぞれがすべて大きなテーマであるため、日本学術会議の対外報告、すなわち、提言あるいは報告として何らかの結論的なことを述べるにはもうしばらくの検討時間を要するものとする。なお、ここでは取り上げる余裕がなかったエネルギーの貯蔵、輸送ほか、エネルギーと科学技術に関連する他の多くの課題についても今後の検討が残されていることを付記する。

これらの各テーマも含めて第 21 期においてさらに検討を深めることが必要である。

<資料>

Richard Doornbosch and Ronald Steenblik: “Round Table on Sustainable Development BIOFUELS: IS THE CURE WORSE THAN THE DISEASE?”
SG/SD/RT (2007) 3 より要点の抜粋

(ア) SUMMARY AND DISCUSSION

The information gathered in this paper gives rise to two fundamental questions:

1. Do the technical means exist to produce biofuels in ways that enable the world to meet demand for transportation energy in more secure and less harmful ways, on a meaningful scale and without compromising the ability to feed a growing population?
2. Do current national and international policies that promote the production of biofuels represent the most cost-effective means of using biomass and the best way forward for the transport sector?

The rush to energy crops threatens to cause food shortages and damage to biodiversity with limited benefits

Second-generation technologies hold promise but depend on technological breakthroughs

The economic outlook for biofuels seems fragile

*Government policies supporting and protecting domestic production of biofuels are inefficient...
are not cost-effective...
... and seem to be on a collision course*

Liberalising trade in biofuels is difficult but essential for global objectives

Certification of biofuels is useful for promoting good practices but cannot be trusted as a safeguard

Policy implications for the near future

To harness the real potential of bio-energy and biofuels an important shift in current expectations and policies is necessary. Based on the findings in this paper, the following policy directions could be debated:

- The strategic importance of and objectives for first generation biofuels need to be refocused and refined. International organisations such as the IEA, OECD, FAO and World Bank need to continue to adopt a soundly-based, common understanding of the limits of both traditional and second-generation biofuels in their analysis of energy futures.
- Priority should be given to research into second-generation biofuels — not only their technologies, but also the assumptions regarding the cost and

long-term availability of feedstocks. Domestic policy efforts should be redirected from (subsidy) instruments aimed at the deployment of biofuels in general back to the R&D and demonstration phase of advanced biofuel technologies.

- Further research is needed to verify the environmental benefits for each biofuel production pathway, feedstock and location.
- Current biofuel support policies place a significant bet on a single technology despite the existence of a wide variety of different fuels and power trains that have been posited as options for the future. National governments should cease to create new mandates for biofuels and investigate ways to phase them out, preferably by replacing them with technology-neutral policies such as a carbon tax. Such policies will more effectively stimulate regulatory and market incentives for efficient technologies.
- Policy efforts to develop certification of biofuels must be unified. Only a global and coherent approach stands a chance of making a positive difference.
- Certification of biofuels - and the design criteria to use them in combination with GHG emissions reduction regulations and preferential tax treatments — should be urgently placed on the WTO agenda. A special committee on trade and environment has been created to channel these discussions and could possibly be used to this end.
- The WTO should also be used to step up efforts to lower trade barriers to biofuels imports, allowing developing countries that have ecological and climate systems more suited to biomass production to use their comparative advantage.
- More work needs to be done to assess the relative importance of biofuels in developing countries as an export commodity and as a means to provide excess to modern, more efficient and less polluting energy sources. It may be that in many developing country circumstances it would be more productive to channel efforts to developing other forms of bioenergy than liquid fuels. More help should be provided to developing countries in identifying opportunities to use biofuels to enhance economic progress.

評価項目について、いくつかの例を次ページ以降に引用する。(キャプション中の引用は4章の文献2) (本報告27ページ) を参照されたい。

(イ) 現在のbiofuelと次世代biofuel (図4. a1)

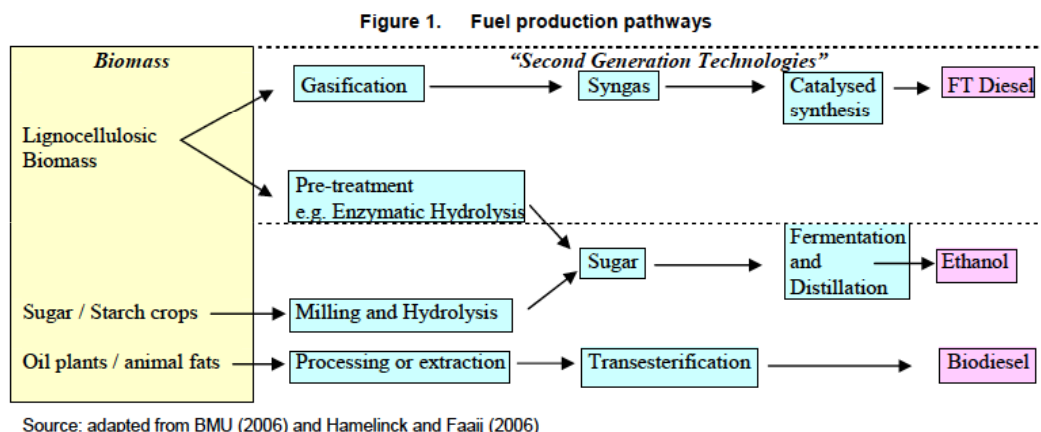
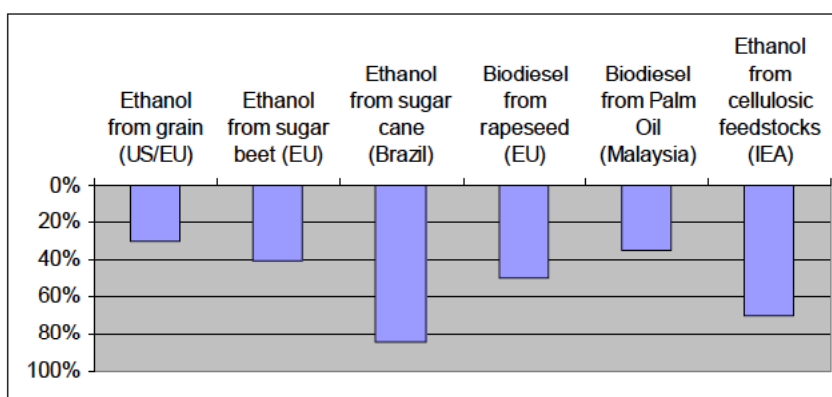


図4. a1 バイオ燃料の開発路線

Second-generation approaches to producing diesel-substitute fuels would provide another possible route. These technologies differ radically from the transesterification process. One involves the gasification of biomass and the further transformation of the gas to a liquid. Using this process, wood, straw or other biomass sources can be turned into a syngas before being converted into a liquid fuel by means of the “Fischer-Tropsch Process” (biomass-to-liquids or BTL). In this way the energy of the entire above-ground plant can be utilised – which is not the case for biodiesel production from oilseeds. The most important barrier for biodiesel currently is its higher cost of production compared with ethanol, with few prospects on the horizon for technological breakthroughs that would lead to substantial cost reductions. BTL synthesis looks more promising than biodiesel, but major technological advances would be needed to bring down its cost (IEA, 2006a).

(ウ) 地球温暖化ガス削減効果 (図4. a2)

Figure 2. Range of estimated GHG Reductions from Biofuels compared with gasoline and mineral diesel



Source: IEA, 2005 and EMPA (biodiesel from Palm oil). Note: Reduction in well-to-wheels CO₂-equivalent GHG emissions per kilometre.

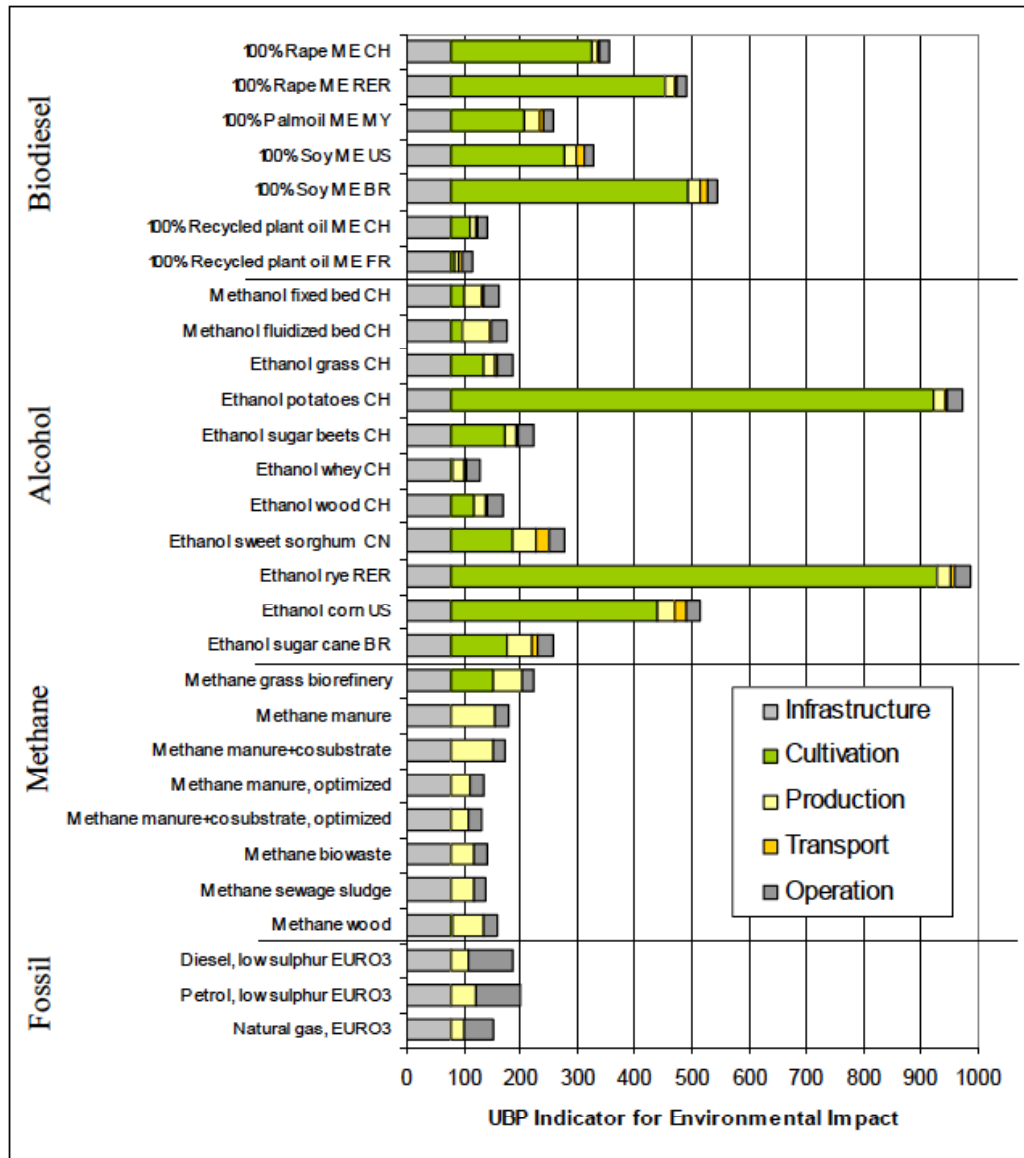
図 4. a2 温暖化ガス削減効率 (石油やディーゼルと比較)

The complexity of the assessment is easily understood when reflecting on the many different elements that must be included in the analyses: the type of crop, the amount and type of energy embedded in the fertilizer used to grow the crop

and in the water used, emissions from fertilizer production, the resulting crop yield, the energy used in gathering and transporting the feedstock to the biorefinery, alternative land uses, and the energy intensity and fuel types used in the conversion process (IEA 2006b). Nevertheless, the general picture that seems to emerge suggests a certain ranking between the different technologies.

(エ) 環境へのインパクト (図 4. a3)

Figure 7. Comparison of aggregated environmental impact of biofuels in comparison with fossil fuel



Source: Zah et al (2007a). Note: UBIP stands for UmweltBelastungsPunkte: a Swiss indicator for the environmental impact.

図 4. a3 : 環境への負荷の比較

The Swiss Institute, EMPA (Zah et al., 2007) performed a full life cycle assessment of a large number of biofuels and compared the environmental footprint with those of transport fuels derived from petroleum and natural gas.

The whole environmental impact was calculated using indicators measuring the damage to human health, ecosystems and the depletion of natural resources aggregated in a single indicator (UBP). Environmental impacts of vehicle operation are indeed much higher when fossil fuels are used. However, this is more than offset in many cases by the very high environmental impacts from agricultural production in terms of soil acidification and excessive fertilizer use, biodiversity loss, air pollution caused by slash-and-burn and the toxicity of pesticides.

＜参考資料＞総合工学委員会エネルギーと科学技術分科会審議経過

平成 18 年

- 12 月 21 日 日本学術会議幹事会（第 30 回）
エネルギーと科学技術分科会設置

平成 19 年

- 1 月 25 日 日本学術会議幹事会（第 32 回）
エネルギーと科学技術分科会委員決定
- 3 月 16 日 エネルギーと科学技術分科会（第 1 回）
分科会設置経緯、役員選出、分科会の進め方について
- 5 月 29 日 分科会役員会
分科会での検討テーマと役割分担について
- 8 月 7 日 エネルギーと科学技術分科会（第 2 回）
イノベーション 25 のテーマとの関連、シミュレーション技術からの試みについて

平成 20 年

- 1 月 21 日 エネルギーと科学技術分科会（第 3 回）
アジア諸国との連携、原子力とシミュレーション、新エネルギーの科学技術的評価、報告書構成について
- 5 月 19 日 エネルギーと科学技術分科会（第 4 回）
報告書内容について
- 9 月 18 日 日本学術会議幹事会（第 64 回）
エネルギーと科学技術に関する分科会記録「エネルギー諸問題における科学技術の役割—現状と課題—」について