

日本エネルギー学会 編

シリーズ 21世紀のエネルギー 16

核融合炉入門

— フュージョンエネルギーへの道 —

工学博士 岡野 邦彦 著

コ ロ ナ 社

日本エネルギー学会
「シリーズ 21世紀のエネルギー」編集委員会

委員長 八木田浩史（日本工業大学）
副委員長 本藤 祐樹（横浜国立大学）
委員 大槻 貴司（横浜国立大学）
(五十音順) 寿原 潤一（電源開発株式会社）
都筑 和泰（エネルギー総合工学研究所）

(2025年3月現在)

刊行のことば

本シリーズが初めて刊行されたのは、2001年4月11日のことである。21世紀に突入するにあたり、この世紀におけるエネルギーはどうなるのか、どうなるべきかをさまざまな角度から考えるという意味がタイトルに込められていた。第1弾は、小島紀徳先生の『21世紀が危ない—環境問題とエネルギー—』であった。当時の本シリーズ編集委員長は堀尾正韜先生であり、小島先生がその後を引き継がれた。ここでは堀尾先生、小島先生の「刊行のことば」を引きながら、シリーズのその後を振り返りつつ、将来に向けての展望を記す。

『科学技術文明の爆発的な展開が生み出した資源問題、人口問題、地球環境問題は21世紀にもさらに深刻化の一途をたどっており、人類が解決しなければならぬ大きな課題となっています。なかでも、私たちの生活に深くかかわっている「エネルギー問題」は上記三つのすべてを包括したきわめて大きな広がりや深さを持っているばかりでなく、景気変動や中東問題など、目まぐるしい変化の中にあり、電力規制緩和や炭素税問題、リサイクル論など毎日の新聞やテレビを賑わしています。』とまず書かれている。2007年から2008年にかけて起こったことは、京都議定書の約束期間への突入、その達成の難しさの中で当時の安倍総理による「美しい星50」提案、そして競うかのような世界中からのCO₂削減提案。あの米国ですら2009年にはオバマ政権へ移行し、環境重視政策が打ち出された。このころのもう一つの流れは、原油価格高騰、それに伴うバイオ燃料ブーム。資源価格、廃棄物価格も高騰した。しかし米国を発端とする金融危機から世界規模の不況、そして2008年末には原油価格、資源価格は大暴落した。本稿をまとめているのは2009年2月であるが、たった数か月前には考えもつかなかった有様だ。嵐のような変動が、「エネルギー」を中心とした渦の中に、世界中をたたき込んでいく。

その後、2011年3月11日、東日本大震災が日本を揺らし、エネルギーをめぐる情勢も大きく揺られて、今日に至っている。原子力発電に対しては、安

全・安心といった面からの見直しが行われつつある。化石燃料から再生可能エネルギーへと舵を切るべく導入された固定価格買取制度は、再生可能エネルギーの導入に対しては大きな効果を上げてきたものの、電力の安定供給と費用負担という観点からは必ずしも十分な成果を上げているとは言い難く、制度の見直しが行われつつある。この間、長年の懸案とされてきた電力・ガスの自由化もスタートした。

地球環境問題に目を転じると、京都議定書から18年、パリ協定は採択からわずか1年足らずというきわめて短期間で発効に至った。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が、産業革命以後の気温上昇を1.5℃に抑えるべきと提言し、温室効果ガスの排出抑制への動きは、より一層高まりつつある。また持続可能な開発目標（SDGs）という将来のあるべき姿に向けて、環境以外の領域を含む目標設定もなされている。

エネルギーは、産業革命以後の人類の発展を支えてきた。21世紀においても、その重要性がなくなることはないであろう。いや、むしろ基本的なインフラとしてエネルギー供給の重要度が増すことは間違いない。

シリーズの発刊から20年近くの時を経て、これまで出版された本シリーズへのご意見やご批判もあろうかと思う。この間の状況の変化に伴い、内容が現在から見た将来とは必ずしも合致しない部分も生じているかもしれない。21世紀という長く、そしてエネルギーにとっては大きな変動の時期を見通すことは難しい。さらに、これからこのようなタイトルを取り上げて欲しいといったご提案もあるかと思う。さまざまご意見・ご要望は、是非、日本エネルギー学会にお寄せいただければ幸甚である。

また、この場をお借りし、これまで多くの労力を割いていただいた歴代の本シリーズ編集委員各位、著者各位、学会事務局、コロナ社に心から御礼申し上げます。加えて現在、本シリーズは、日本エネルギー学会誌および機関誌「えねるみくす」の編集委員会の委員各位からさまざまご意見を賜りながら編集を進めている。改めて関係者各位に御礼申し上げます次第である。

2018年11月

「シリーズ 21 世紀のエネルギー」 編集委員長 八木田 浩史

はじめに

核融合はかつては夢といわれてきたが、半世紀以上にわたる研究開発により、いまや手の届くところになった。ただし、最近の報道でしばしば伝えられるような10年で実用化可能、というようなものではない。この本では、核融合技術開発を続けてきた専門家として、核融合開発の本当の現状と将来の見通しについて、わかりやすく解説する。

本書名を核融合入門でなく核融合炉入門としたのには意図がある。核融合の本として、原子物理やプラズマ物理の解説から順に書けば、核融合炉の話になるのは本の後半ということになりがちだ。本書では、それらの解説は最小とし、第1章のフュージョン炉の基本を読み終わるころには、核融合炉とはどんなものか、その概要はわかるようになっていく。それ以後の章では、少しずつ内容を深め、範囲も広めながら、さらに詳細がわかっていく構成とした。

本書では、一つ、読者優先で決断したことがある。核融合技術全体を取り扱う解説書では、関係者からの苦情が出ないように、実用化への重要度に関係なく、研究者から見た分野バランスに気をつけて内容を構成することが少なくない。しかし、これは読者には関係がないことだ。本書では、そのような気づかいは一切しないことにし、40年以上にわたる著者の核融合炉研究の経験に基づき、核融合炉の実用化研究に特に重要と著者が考えることを中心に書いてある。そのため、核融合関連の研究のすべてを網羅してはいない。一方で、ふつうは書かないような失敗の歴史や見えにくい事情まで記載した。著者にとっては、読者の皆様に、核融合炉開発の現状に至る経緯や、実用化に近づきつつある最先端の研究などをわかっていただけることが最も重要なので、このような選択をした。それ以外の意図はない。

核融合エネルギーは、世界的には fusion energy と呼ばれるのが普通である。

2023年6月8日に、高市早苗経済安全保障担当大臣（当時）から、日本語名称も「核融合エネルギー」から「フュージョンエネルギー」に変更するとの政府発表があった。遡れば、2002年6月の核融合エネルギー連合講演会の特別講演で、元参議院議長の山東昭子氏が名称の変更を提案されたのがその起点と思う。それから21年かかったが、ようやく正式に変更された。それに沿って、これ以後の本文では、核融合の語は、原則として「フュージョン」と表記している。

本書が、読者の皆様のフュージョンエネルギーの理解に少しでも役立てば幸いである。

謝辞

本書の執筆にあたり、キヤノングローバル戦略研究所の杉山大志氏には、フュージョンエネルギーへの疑問点のご指摘や、一般に向けた説明の仕方などについて多数のアドバイスをいただきました。この本がまとめられたのは、それらがあったからこそでした。ここに心からの謝意を表します。

また、出版にあたってご尽力いただいたコロナ社様、ならびにシリーズ 21世紀のエネルギーの一つとして受け入れ、内容の確認もいただいた日本エネルギー学会様に感謝いたします。

2025年3月

岡野 邦彦

目 次

1 フュージョン炉の基本

1.1	フュージョンエネルギーとは	1
1.1.1	核分裂反応とフュージョン（核融合）反応の違い	2
1.1.2	重水素・三重水素の反応	3
1.2	1億℃を閉じ込める方法（磁場とレーザー）	4
1.2.1	磁場による閉じ込め	5
1.2.2	慣性力による閉じ込め（レーザー方式）	6
1.3	過去の開発史と日本の試験装置 JT-60SA	7
1.3.1	磁場方式フュージョン炉の基本構造	7
1.3.2	磁場方式による開発の歴史	9
1.4	国際協力で建設が進むフュージョン実験炉 ITER	11
1.4.1	ITER 計 画	11
1.4.2	今 後 の 計 画	14
1.5	フュージョン炉のおもな要素技術	15
1.5.1	原型炉実現に向けた五つの要素技術	15
1.5.2	統合装置としての ITER の役割	21
1.6	実用化に向けた開発計画とコスト	21
1.7	フュージョン炉の基本のまとめ	23

2 フュージョン炉に関するよくある疑問と回答

2.1	水爆のように爆発しないのか	24
-----	---------------	----

2.2	福島事故のようにならないか	26
2.2.1	冷却できなくなったらどうなる？	26
2.2.2	それでも止まらなかったら？	27
2.3	放射性廃棄物で破綻しないのか	28
2.3.1	廃棄物の放射能は100年で減衰する	29
2.3.2	100年後の廃棄物の量	30
2.3.3	ITERの廃棄物量	32
2.3.4	安全性と潜在的ハザード比較	32
2.4	1億℃なのにお湯を沸かして発電するのか	33
2.5	フュージョン炉を造る材料はあるのか	35
2.5.1	実験炉ITERの材料	35
2.5.2	原型炉の材料	36
2.5.3	実用炉の材料	37
2.5.4	じつは役に立っている中性子	37
2.6	フュージョン炉に関するよくある疑問と回答のまとめ	38

3 磁場方式フュージョン炉

3.1	閉じ込め磁場の構成	39
3.1.1	トカマクフュージョン炉の構成	39
3.1.2	磁力線をねじる方法	40
3.2	1億℃への加熱と電流の駆動	42
3.2.1	電磁誘導による電流の駆動	43
3.2.2	いろいろな加熱方法	44
3.2.3	電磁誘導ではない電流の駆動法	49
3.3	日欧の成功と米国の挫折	52
3.3.1	3大トカマクの時代	52
3.3.2	Lモードによる危機	53
3.3.3	Hモードの発見	54

3.3.4 Hモードへの対応が死命を制した	56
3.4 プラズマ性能の制約条件	57
3.4.1 エネルギー閉じ込め指数 H	58
3.4.2 プラズマ圧力指標 G	61
3.4.3 プラズマ密度指数 R	61
3.4.4 原型炉に向けた JT-60SA と ITER の役割	62
3.5 磁場方式フュージョン炉のまとめ	62

4 資源量と燃料増殖の仕組み

4.1 燃料資源はどこにあるのか	64
4.1.1 資源量での比較	65
4.1.2 重水素濃縮の工業技術はすでにある	66
4.2 燃料増殖：リチウムから三重水素を作る	67
4.2.1 三重水素の増殖方法	67
4.2.2 リチウム 6 の濃縮法	68
4.3 最初に三重水素がなくても起動できる	69
4.3.1 DD スタートとその重要性	70
4.3.2 DD スタートの副産物	72
4.4 資源量と燃料増殖の仕組みのまとめ	74

5 ITER 計画の進捗と目標

5.1 ITER 計画の進捗	75
5.2 実験炉 ITER の仕様と構造	77
5.2.1 ITER の大きさと設計仕様	77
5.2.2 ITER のコイル構造と建造方法	79
5.3 ITER の目標と達成の見通し	82
5.3.1 ITER の物理目標：第 1 段階	82

5.3.2 ITERの物理目標：第2段階	83
5.3.3 フュージョン炉工学技術の統合試験	84
5.4 ITER計画の進捗と目標のまとめ	85

6 イノベーションの歴史と期待

6.1 プラズマ性能のイノベーション	86
6.1.1 トカマクの発明	86
6.1.2 自己駆動電流の発見	88
6.1.3 期待されるイノベーション：自己燃焼プラズマ	90
6.2 超伝導コイルのイノベーション	92
6.2.1 ニオブスズ導体コイルのイノベーション	93
6.2.2 期待されるイノベーション-1：React and Wind	93
6.2.3 期待されるイノベーション-2：長寿命絶縁体	95
6.2.4 期待されるイノベーション-3：高温超伝導	95
6.3 ダイバータでのイノベーション	97
6.3.1 ダイバータによるHモードの実現	97
6.3.2 ダイバータに必要な今後のイノベーション：来る前に冷やす	97
6.4 ブランケットでのイノベーション	98
6.4.1 ブランケット構造での過去のイノベーション	98
6.4.2 ブランケット構造での期待されるイノベーション	100
6.5 加熱・電流駆動装置のイノベーション	102
6.5.1 宇宙技術から来たNBI	103
6.5.2 負イオンNBIのイノベーション	104
6.6 遠隔保守のイノベーション	105
6.6.1 ITERの遠隔保守	105
6.6.2 今後に期待されるイノベーション：上に抜く，横に抜く	106
6.7 イノベーションの歴史と期待のまとめ	107

7 磁場フュージョン炉の概念設計と経済性

7.1 ITERで発電したら正味電力は出るか	108
7.2 フュージョン炉の概念設計	110
7.2.1 実用炉の概念設計	110
7.2.2 原型炉の概念設計	114
7.2.3 CSコイル容量と装置サイズの関係	117
7.3 建設コストと発電コストの予測分析	119
7.3.1 総建設費の分析	119
7.3.2 発電原価の分析	120
7.4 磁場フュージョン炉の概念設計と経済性のまとめ	122

8 慣性（レーザー）方式フュージョン

8.1 レーザー方式の原理と特長	123
8.2 米国におけるレーザー方式の進展	125
8.3 日本の発明：高速点火法	129
8.3.1 高速点火法と中心点火法	129
8.3.2 爆縮で発生する不安定性	131
8.4 レーザーフュージョン炉の概念設計	132
8.5 レーザー方式特有の技術課題	133
8.6 慣性（レーザー）方式フュージョンのまとめ	137

9 ベンチャーによる早期実用化の実情

9.1 いろいろなフュージョン反応	139
9.2 先進燃料フュージョン実現には高いハードルがある	141
9.2.1 ヘリウム炉の場合	142

9.2.2 ボロン炉の場合 144

9.3 民間投資に関する法的背景の視点 147

9.4 ベンチャーによる早期実用化の実情のまとめ 148

10 実用化に向けた開発計画

10.1 日本の開発ロードマップ 150

10.2 海外の開発計画 152

10.2.1 欧州の開発計画 152

10.2.2 米国の事情と計画 153

10.2.3 英国の事情と計画 153

10.2.4 中国は日欧に迫る 154

10.3 実用化に向けた開発計画のまとめ 156

11 今後に向けての提言 157

引用・参考文献 159

おわりに 162

1

フュージョン炉の基本

フュージョン反応の基礎，フュージョン炉の構造，開発史と将来計画，実用炉の要素技術等，フュージョン炉の全体像を知るための基本を解説する。

1.1 フュージョンエネルギーとは

石油，石炭，薪などが燃えると熱が出る。火力発電所はその熱を使って発電している。著者がこどものころは，薪を燃やして風呂のお湯を温めていた。これらの「燃える」現象は，化学反応でエネルギーを放出する化学燃焼である。化学反応が起こると化学物質（分子）は変わるが，それを構成する元素（原子）は同じままで，化学反応によってなくなったり変わったりする元素はない。

一方，本章の以下で説明する反応は，核反応という化学反応とは異なる反応である。元素が分裂したり，融合したりして別の元素に変わる。そのときに出るエネルギーを核エネルギーという。化学反応と異なり，変わった後の元素の合計重量が，変わる前の合計重量より，ほんの少しだけ軽くなる[†]。減った質量はどうなったのだろう。それは核エネルギーとして放出されたのである。

質量 m とエネルギー E は，光の速度 c を使って， $E=mc^2$ と書ける。これは，アインシュタインの特殊相対性理論から導かれる式だ。消えた質量分のエネルギーが，この式のとおり放出される。同じ重さの燃料で考えると，得ら

[†] 核エネルギーがマイナスの核反応もあり，その場合は，反応でエネルギーを吸収し，そのエネルギー分だけ質量が増える。

2 1. フュージョン炉の基本

れるエネルギーは、核エネルギーのほうが化学エネルギーよりはるかに大きく、1000万倍以上である。本書のこれ以降では、「化学燃焼」と書いていない場合は、「燃焼」は核反応で熱を発生する「核燃焼」のことを意味している。

1.1.1 核分裂反応とフュージョン（核融合）反応の違い

ウランやプルトニウムなどの重い元素が分裂するときの核エネルギーを利用するのが、現在の原子力発電所の原子炉、すなわち核分裂炉である（表 1.1）。

表 1.1 核分裂（フィッション）と核融合（フュージョン）

核分裂 (fission)	重い元素（ウランなど）の分裂で エネルギー発生	⇒ 分裂後はさまざまな元素 （放射性物質も）
核融合 (fusion)	軽い元素（水素など）の融合で エネルギー発生	⇒ 融合後は特定の元素 （ヘリウムなど）

日本でもおもに使われている商用の原子炉は軽水炉と呼ばれる方式で、水を使って冷却している。水に「軽」が付くわけは、次項で解説する。1995年にナトリウム漏れを起こして、2016年には廃炉が決まった「もんじゅ」は、軽水炉ではなく、高速炉または高速増殖炉という種類だ。軽水炉も高速炉も、核分裂（フィッション）反応を利用する炉、すなわち核分裂炉である点は同じである。

一方、フュージョン炉では、水素などの軽い元素が融合するときに出る核エネルギーを利用する。ウランやプルトニウムとは無縁である。

粘土を二つにちぎるとき、ちょうど半分に分けるのは難しく、さまざまな重さの粘土が二つできる。それと同様で、核分裂反応では、大きな一つの原子核が分裂して二つの原子核ができるので、分かれ方がいろいろあり、さまざまな核反応生成物ができる。その中には、わずかだが、非常に長期にわたり放射線を出す元素が含まれ、それらを長期にわたって安全に管理する必要がある。

これに対して、フュージョン反応では、二つの原子核が合体（融合）して一つの原子核になるので、普通は1種、多くても数種類の元素しかできない。これがフュージョン炉からの放射性廃棄物が比較的取り扱いやすくなる理由だ。フュージョン炉にはウランなどの核燃料は使わないので、核分裂炉で発生する

使用済核燃料からの高レベル放射性廃棄物が出ないことが、フュージョン炉のメリットの一つとされる。ただし、フュージョン反応は中性子が発生することが多く、それがフュージョン炉内部の材料を放射化するので、放射性廃棄物が出る。この点は第2章と第3章で詳しく解説する。

1.1.2 重水素・三重水素の反応

通常の水素（元素記号 H）のことを、以下に説明する重水素等と区別するために軽水素と呼ぶ。前項で出てきた「軽水」は、この「普通の水素 H」でできている「普通の水 H_2O 」のことである。O は酸素の元素記号だ。

太陽の中では、軽水素どうしがフュージョン反応を起こしている。この反応は反応率が大変低い。それでも太陽が非常に大きいので、燃焼反応が維持できている。しかし、地上でフュージョン炉を実現するには、はるかに小さな体積で実現しなければならないから、もっと反応率が高いフュージョン反応を使う必要がある。それが重水素 D と三重水素 T との反応（以下 DT 反応）だ（図 1.1）。

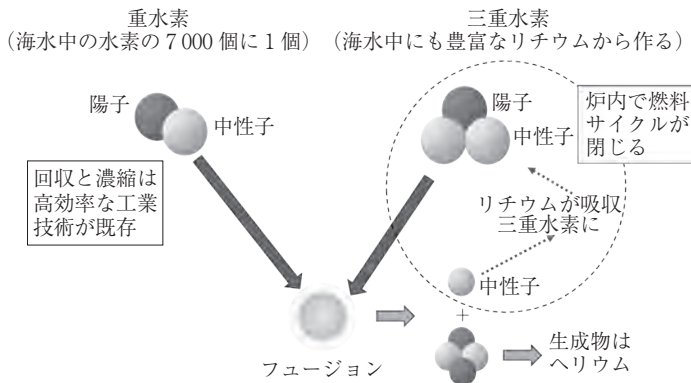


図 1.1 DT 反応。この反応ではヘリウムと中性子ができる。

なお、三重水素はトリチウムとも呼ばれるが、対応する重水素の英語デュエリウムはあまりなじみがなく、またフュージョン炉にはリチウムも使うために、それにトがついたトリチウムは紛らわしいので、本書ではトリチウムでは

4 1. フュージョン炉の基本

なく、三重水素という呼称を使う。

重水素は、質量数（原子の重さの単位）が1の軽水素原子に1個の中性子が加わって質量数が2になった水素同位体といわれる元素だ。三重水素は中性子が2個加わった質量数が3の水素同位体だ。どちらも水素には違いなく、化学的性質はほとんど軽水素と同じだが、核反応においての性質は大きく異なる。

反応率が低い軽水素のフュージョンと異なり、DT反応は、約1億℃から高い反応率が得られ、地上に設置できる程度の大きさのフュージョン炉にできる。DT反応で発生するのは質量数が4の普通のヘリウム（ ${}^4\text{He}$ ）と中性子である。この中性子を、フュージョン炉の反応部の周辺に置いたリチウムに吸収させることで、三重水素を作り出すことが可能である。三重水素は地球上の資源としてほとんど存在しないのだが、電池にも使われるリチウムは地球上に豊富にある。いまは鉱山や塩湖から採掘しているが、海水にも豊富に含まれ、海水からの回収技術も既存だ。そのリチウムを使ってフュージョン炉内で三重水素を増殖することができ、増殖率は1以上、つまり消費するより多い量の三重水素の生産が可能だから、フュージョン炉の燃料資源の一つは海水中にほぼ無尽蔵に存在するリチウムということになる。

もう一方の燃料の重水素は、海水中の水素（ H_2O のH）のうち、7000個に1個は重水素Dなので、やはり、無尽蔵といってよい量がある。海水からの重水素の濃縮と回収もすでに高効率な工業技術が確立されている。

1.2 1億℃を閉じ込める方法（磁場とレーザー）

水素は高温になると、原子を構成する原子核と電子の結合が解け、原子核と電子がバラバラに動くようになる。この状態をプラズマという。フュージョン炉を造るには1億℃程度の非常に高温のプラズマを閉じ込める必要がある。太陽などの恒星は、プラズマを自分自身の強い重力で球状に閉じ込めてフュージョン反応を起こしている。そのような重力での閉じ込めは現在の技術ではできないので、フュージョン炉では、重力でなく磁場または慣性力で閉じ込め

る。この「慣性」の意味は、1.2.2項で説明する。

1.2.1 磁場による閉じ込め

通常のガスを構成する原子は電氣的に中性なので磁場からの力を受けないが、高温でプラズマになると原子核（電氣的にプラス）と電子（マイナス）がバラバラになっているので、それぞれが磁場からの力を受けるようになる。磁力線とは磁氣の方向を示す線だ。小学生のころ、紙の上の砂鉄と、紙の裏に置いた磁石で砂鉄の作る筋を見た記憶はないだろうか。それが磁力線である。磁力線があると、イオンも電子も、磁力線を中心に旋回するように動く（**図 1.2**）。

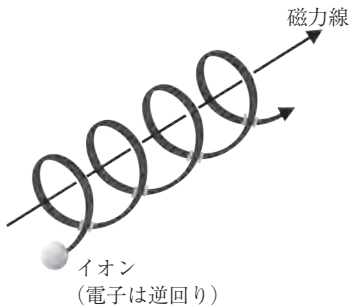


図 1.2 磁力線に沿ったイオンの動き。電子の場合は、らせんが逆回りになる。

イオンも電子も磁力線に沿う方向には動けるが、磁力線から離れることはできない。この性質を利用すれば、磁場でプラズマの拡散を妨げることができる。磁力線に沿っては動けるから、磁場方式のフュージョン炉では、磁場をドーナツ（トーラス）状にして、プラズマを閉じ込める（**図 1.3**）。

ただし、プラズマを覆う磁力線がトーラスに沿って全部平行では、プラズマが安定に閉じこもらないことがわかっている。それを安定化するには、磁力線を必ずねじる必要がある。また、ねじれていても、磁力線が全部平行だと漏れやすいので、ねじれピッチを少しずつ変えた磁場で多重に覆うことで、漏れを減らしてうまく閉じ込めることができる。このような磁場をどのようにして作るのかは第3章で解説する。

引用・参考文献

※記載 URL は 2025 年 3 月確認

- 1) Okano, K., Asaoka, Z., Yoshida, T., et.al. : Compact reversed shear tokamak reactor with a superheated steam cycle, *Nuclear Fusion*, **40**, pp.635~646 (2000)
- 2) 森 雅博：量子科学技術研究開発機構における核融合研究開発の概況，核融合科学技術委員会（第 10 回） 配布資料，資料 4（2017）
- 3) 坂本宜照：原型炉の基本設計について，核融合科学技術委員会（第 25 回） 配布資料，資料 2-2（2021）
- 4) 核融合会議開発戦略検討分科会：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，平成 12 年 5 月 17 日
- 5) Tobita, K. and Hiwatari, R. : 小特集「核融合炉の経済性と環境負荷」 3.1 放射性廃棄物削減へ向けた研究の現状，*Journal of Plasma and Fusion Research*, **78**, 11, pp.1179~1185 (2002)
- 6) 経済産業省：基本政策分科会に対する発電コスト検証に関する報告，発電コスト検証ワーキンググループ，令和 3 年 9 月，https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/pdf/cost_wg_20210908_01.pdf
- 7) 首相官邸：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 - 東京電力福島原子力発電所の事故について - (2011)
- 8) Wagner, F. : Physics of magnetic confinement fusion, *The European Physical Journal Conference*, **54**, 01007 (2013)
- 9) Cordey, J.G., et al. : A theory of currents induced by radio-frequency waves in toroidal plasmas, *Plasma Physics*, **24**, 1, p.93 (1982)
- 10) ITER Physics Expert Groups on Confinement and Transport and Confinement Modelling and Database : Chapter2: Plasma confinement and transport, *Nuclear Fusion*, **39**, 12 (1999), <https://www.afs.enea.it/vlad/Papers/ITERPBch299nf.pdf>
- 11) JT-60SA Research Plan = Research Objective and Strategy = Ver.4.0 JT-60SA Research Unit (2018)
- 12) 環境省：水銀に関する水俣条約の概要，<https://www.env.go.jp/chemi/tmms/convention.html>
- 13) 日本原子力研究開発機構：4-10 核融合燃料トリチウム製造に必要な ^6Li の分離濃縮 - イオン液体による革新的リチウム同位体分離濃縮技術の開発 -，https://rdreview.jaea.go.jp/review_jp/2012/j2012_4_10.html
- 14) 量子科学技術研究開発機構：核融合最前線，No. 13 (2018)，<https://www.qst.go.jp/uploaded/attachment/10605.pdf>
- 15) 量子科学技術研究開発機構：核融合発電 第 8 回 リチウム，海水・電池から回収，<https://www.qst.go.jp/site/fusion/nks-rensai-08.html>
- 16) 山西敏彦：トリチウムの物性等について (2013)，https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/tritium_tusk/pdf/160603_02.pdf

- 17) Asaoka, Y., Konishi, S., Nishio, S., Hiwatari, R., Okano, K., Yoshida, T. and Tomabechi, K. : Commissioning of a DT fusion reactor without external supply of tritium, 18th IAEA Fusion Energy Conf., Sorrento, Italy (2000)
- 18) Tokimatsu, K., et. al. : Potential of fusion energy in the context of tritium supply, Fusion Science & Technology, **41**, 3 II, pp. 831~834 (2002)
- 19) 鎌田裕 : ITER 計画の進捗状況。第 38 回核融合科学技術委員会, 第 35 回原型炉開発総合戦略タスクフォース合同開催, 資料 4 (2024), https://www.mext.go.jp/content/20240925-mxt_kaisen-000038042_05.pdf
- 20) 量子科学技術研究開発機構 : 核融合炉の効率的な燃焼制御への道筋を切り開く一炉心プラズマの加熱に必要な高速ヘリウムを閉じ込めつつ, 不要な低速ヘリウムを選択的に排出する条件を発見, <https://www.qst.go.jp/site/press/20221024.html>
- 21) Utoh, H., Tobita, K., Someya, Y., Takase, H. : Conceptual study of vertical sector transport maintenance for DEMO fusion reactor, Fusion Engineering and Design, **87**, 7-8, pp. 1409~1413 (2012)
- 22) Kikuchi, M. : Steady state tokamak reactor based on the bootstrap current, Nuclear Fusion, **30**, 2, pp. 265~276 (1990)
- 23) Nishio, S., et al. : Maintenance oriented tokamak reactor with low activation material and high aspect ratio configuration, Fusion Energy, **3**, pp.693~699 (1997)
- 24) Ogawa, Y., Inoue, N., Yoshida, Z. and Okano, K. : Parameter optimization of the inductively operated day-long tokamak reactor, Fusion Technology, **24**, 2, pp.188~199 (1993)
- 25) Nishio, S., Tobita, K., Tokimatsu, K., et.al. : Technological and environmental prospects of low aspect ratio tokamak reactor VECTOR, 20th IAEA Fusion Energy Conf., Vilamoura (2004)
- 26) 原子力委員会核融合専門部会報告書, 平成 17 年 10 月, http://www.aec.go.jp/kaigi/senmon/gijutsu_wg/siryoo/07-1-1_haifu.pdf
(報告書はネット上にないので, その審議の最終版を示す)
- 27) Hiwatari, R., Okano, K., Asaoka, Y., Shinya, K. and Ogawa, Y. : Demonstration tokamak fusion power plant for early realization of net electric power generation, Nuclear Fusion, **45**, 2, pp. 96~109 (2005)
- 28) Tobita, K., Nishio, S., Sato, M., Sakurai, S., Hayashi, T., et al. : SlimCS –compact low aspect ratio DEMO reactor with reduced-size central solenoid, Nuclear Fusion, **47**, 8, pp.892~899 (2007)
- 29) 第 13 回原型炉開発戦略会合, 資料 2, 令和 2 年 9 月 28 日, および, 岡野邦彦, 飛田健次 : 核融合原型炉開発の動向 アクションプランと核融合工学研究の進展, 日本原子力学会誌, **60**, 10, pp.637~641 (2018)
- 30) Hiwatari, R., Goto, T., et.al. : Assessment on Tokamak Fusion Power Plant to Contribute to Global Climate Stabilization in the Framework of Paris Agreement, Plas.Fusion.Res., **14**, pp. 1305047-1~1305047-5 (2019)
- 31) 岡野邦彦 : ITER 建設以後の知見に基づく核融合実用炉のコスト, https://ieei.or.jp/2022/06/expl220629/?doing_wp_cron=1723196801.862023115158081054687535
- 32) Powell, H. T., Paisner, J. A., Payne, S. A. : IFP/07 Possible driver path from the National Ignition Facility to Inertial Fusion Energy, Extended Synopses of 17th IAEA Fusion Energy Conference, IAEA, p. 225, (1998)
- 33) 三間豊典 ほか : レーザー核融合炉「光陽」概念設計, 大阪大学レーザー核融合研究センター (1995)

- 34) 神前康次 ほか：小特集 高速点火レーザー核融合発電プラント (KOYO-Fast) の概念設計, *Journal of Plasma Fusion Research*, **82**, 12, pp.817-835 (2006)
- 35) Someya, Y., Matsumoto, T., Okano, K., et.al. : Maintenance method and its critical issues for a fast-ignition laser fusion reactor based on a dry wall chamber, *Journal of Physics : Conference Series*, **112**, Part 3, 032037 (2008)
- 36) 岡野邦彦, 朝岡善幸, 日渡良爾, 吉田智朗：核融合炉の遮蔽部発熱を利用した高効率水素製造, *Journal of Plasma Fusion Research*, **77**, 6, pp. 601-608 (2001)
- 37) 松浦秀明：先進燃料核融合プラズマ及びその核燃焼, *Journal of Plasma and Fusion Research*, **98**, 2, pp.65-71 (2022)
- 38) 高橋俊樹 ほか：小特集 先進燃料核融合研究の現状と展開, *Journal of Plasma Fusion Research*, **98**, 2, pp.63-98 (2022), https://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2022_02/9802SPall.pdf
- 39) Ochs, I. E., Kolmes, E. J., Mlodik, M. E., Rubin, T. and Fisch, N. J. : Erratum : Improving the feasibility of economical proton-boron-11 fusion via alpha channeling with a hybrid fast and thermal proton scheme [Phys. Rev. E 106, 055215 (2022)], *Phys. Rev. E.*, **109**, 4-2, 049901 (2024)
- 40) ロイター：米ロッキード、10年以内に小型核融合炉実用化へ, <https://jp.reuters.com/article/lockheed-fusion-idJPKCN0I509K20141016>
- 41) 文部科学省：原型炉研究開発ロードマップについて（一次まとめ）, https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/houkoku/1408259.htm
- 42) 内閣府：第6回 イノベーション政策強化推進のための有識者会議「核融合戦略」, <https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/6kai/6kai.html>
- 43) PSFC : SPARC, <http://www-new.psfc.mit.edu/sparc>
- 44) Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences : CRAFT on the Way, https://english.hf.cas.cn/nr/ps/202204/t20220412_304060.html
- 45) Zhuang, G., et. al. : Progress of the CFETR design, *Nuclear Fusion*, **59**, 11 (2019), <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Shared%20Documents/FEC%202018/fec2018-preprints/preprint0216.pdf>
- 46) 内閣府：フュージョンエネルギー・イノベーション戦略, 令和5年4月14日 統合イノベーション戦略推進会議, https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/fusion_senryaku.pdf
- 47) キヤノングローバル戦略研究所：核融合も中国か, https://cigs.canon/videos/20240125_7836.html
- 48) 「核融合エネルギーのきほん」出版委員会 編：図解でよくわかる 核融合エネルギーのきほん, 誠文堂新光社 (2021)

おわりに

自分の人生を変えた本に出会えたというのは幸運なことだ。私にとっての本は、故 吉川庄一先生が1974年に出された「核融合への挑戦」（講談社ブルーバックス）だった。この本でフュージョン研究の道に進んだ人は私の世代には多いが、私もその一人だった。

その後、私は大学院博士課程時代に、いろいろな幸運に恵まれ、米国プリンストン大学プラズマ物理研究所（PPPL）で臨時雇いの研究員として1年ほど働く機会を得た。さらに幸運なことに、そこで当時はプリンストン大学教授でいらした吉川庄一先生と直接お会いすることになる。PPPL所内でお会いするたび、いろいろなお話を聞かせていただいた。ご自宅に呼んでいただいたことまであり、私には本当に幸運な1年であった。



吉川庄一先生（1983年、
プリンストンのご自宅に
て著者が撮影）

その吉川先生のお言葉で、とりわけ印象に残るのが、「核融合は、いろいろな点で、ギリギリできそうなのに、惜しいところでもう少しなんだ」というお言葉だ。確かに、一つでも、到底できないほど難しい点があれば、人類はフュージョン炉の開発をあきらめなければならなかったかもしれないが、DT反応率、閉じ込め性能、電流駆動の効率、等々、どれをとっても、桁はずれに無理そうな点はなく、もう少しなのに簡単にはできない、という点ばかりなのである。しかも、これは無理かもしれない、という危機があるたび、Hモードや自己駆動電流という救いの手が差し伸べられる。

吉川先生のお話をお聞きして以来、私は、その「もう少し」を詰めることばかりを考えてきたが、いまや、どうすればフュージョン炉ができるかは、一つ

を除いてすべてわかったと思う。そのたった一つとは、発電コストだ。高くてもよいなら、フュージョン炉が実現できることはわかった。しかし、経済性のあるコストで発電できるかだけは、まだわからない。だがそれも、桁が違うほど高くはなさそうだ。コストもまた、「もう少し」まで来たのだ。おそらく初代炉は高くつくだろうが、製造技術等の進歩で、いずれは安くなり、人類に無限のエネルギーを供給してくれるはずだ。私が生きている間にそれを目撃できるかはわからないが、この本を読まれた方には、それを目撃し、フュージョン時代幕開けの証言者になってほしいと願っている。

2025年3月、自宅にて

岡野邦彦

— 著者略歴 —

1953年東京生まれ。東京大学工学部原子力工学科卒業。東京大学大学院工学系研究科 博士課程修了，工学博士。株式会社東芝 R&D センター，電力中央研究所，国際核融合エネルギー研究センター（副事業長），慶應義塾大学理工学部機械工学科（教授）を経て，現職は株式会社 ODAC 取締役。プラズマ物理を基盤に，炉工学まで広く含めた核融合炉の概念設計の研究を続けてきた。YouTube でも核融合の一般向け解説を多数公開している。文部科学省 核融合科学技術委員会委員，同核融合開発戦略タスクフォース主査などを歴任。中学生時代からオーディオを愛好し，デジタル録音，CD，SACD，ハイレゾの登場を体験した。同じく中学生時代にはじめて天体写真では，新しい画像処理法の「デジタル現像法」や，露出時間を大幅に短縮できる「LRGB 合成カラー撮影法」を開発した天体写真家としても知られている。

おもな著作に，「デジタル・アイ冷却 CCD でとらえた深宇宙」地人書館（1998），「冷却 CCD カメラによる天体撮影テクニック」誠文堂新光社（2002），「プラズマエネルギーのすべて（共著）」日本実業出版社（2007），「天文年鑑（冷却 CCD/CMOS・デジタル一眼カメラの項を執筆）」誠文堂新光社（2008 年版以後），「冷却 CCD カメラ・テクニック講座」誠文堂新光社（2009），「人類の未来を変える核融合エネルギー（共著）」シーアンドアール研究所（2016），「その常識は本当か これだけは知っておきたい 実用オーディオ学」コロナ社（2019），「核融合エネルギーのきほん（共著）」誠文堂新光社（2021），などがある。

核融合炉入門

— フュージョンエネルギーへの道 —

© 一般社団法人 日本エネルギー学会 2025

2025年5月28日 初版第1刷発行

検印省略

編者 一般社団法人
日本エネルギー学会
ホームページ <https://www.jie.or.jp>
著者 岡野邦彦
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 萩原印刷株式会社
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-06838-2 C3350 Printed in Japan

(西村)



本書のコピー，スキャン，デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上の例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は，いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。