

JAERI-Tech
2001-030



核融合研究開発の波及効果

2001年3月

(編) 波及効果調査委員会

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

核融合研究開発の波及効果

日本原子力研究所 那珂研究所

(編) 波及効果調査委員会

(2001 年 2 月 16 日受理)

核融合研究は、物理学、電磁力学、熱力学、機械工学、電気・電子工学、材料工学、伝熱流動・熱工学、核工学、低温工学、化学工学、制御工学、計測工学、真空工学など、極めて広い学問分野に基礎をおき、核融合装置はそれらの先端技術の集積により構成されている。このため、要素機器の開発に伴い個々の技術分野が進歩するだけでなく、分野間での相互刺激が科学技術全体のポテンシャルを高めることにも寄与している。その成果がもたらす波及効果は、半導体産業、大型精密機械加工などの一般民生用技術ばかりでなく、加速器技術、超伝導利用技術、計測診断技術、プラズマ応用技術、耐熱・耐重照射材料技術、真空技術、計算機シミュレーション技術など、物理、宇宙、材料、医学、通信、環境など、他の分野の先端技術開発や基礎科学研究の発展に多大の貢献を果たしている。本報告では、これらの波及効果の現状を、特に ITER 活動開始以降の成果の工業技術分野への波及効果を中心に調査・検討し、他分野への応用の可能性を含め、核融合開発に携わる研究者の視点から取り纏めた。

核融合研究開発は、先端性の強い工学技術をシステム化する性格が強いが、身近な工業技術への波及、先端技術としての他分野への影響、基礎的な学問の活性化、のそれぞれについて大きな成果をこれまでにあげてきており、今後、科学技術全体の活性化と発展を促す可能性をもっている。これまでに得られている成果は、波及効果や基礎的な研究を目的としてあげられたものではなく、核融合実験炉という具体的な目標のための研究開発の結果として発生したものであり、今後、ITERの実機の製作、運転を行う段階では、より一層こうした波及技術の発生は加速するものと期待できる。

那珂研究所： 〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

編集者：小泉 興一、小西 哲之、辻 博史、奥村 義和、今井 剛、秋場 真人、
小原 祥裕、西 正孝、菱沼 章道、竹内 浩、菊池 満、小関 隆久、
岸本 泰明、細金 延幸、宮 直之、阿部 哲也、栗山 正明、藤井 常幸

Spin-off Produced by the Fusion Research and Development

(Eds.) Spin-off Research Committee in Naka Est.

Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 16, 2001)

Nuclear fusion devices are constructed by the integration of many frontier technologies and fusion science based on a wide area of science such as physics, electromagnetics, thermodynamics, mechanics, electrical engineering, electronics, material engineering, heat transfer and heat flow, thermal engineering, neutronics, cryogenics, chemical engineering, control engineering, instrumentation engineering, vacuum engineering. For this, the research and development of elementary technology for fusion devices contributes to advance the technology level of each basic field. In addition, the mutual stimulus among various research fields contributes to increase the potential level of whole "science and technology". The spin-offs produced by the fusion technology development give much contribution not only to the general industrial technologies such as semiconductor technology, precision machining of large component, but also contribute to the progress of the accelerator technology, application technology of superconductivity, instrumentation and diagnostics, plasma application technology, heat-resistant and heavy radiation-resistant material technology, vacuum technology, and computer simulation technology. The spin-off produced by the fusion technology development expedite the development of frontier technology of other field and give much contribution to the progress of basic science on physics, space science, material science, medical science, communication, and environment.

This report describes the current status of the spin-off effects of fusion research and development by focusing on the contribution of technology development for International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) to industrial technology. The possibilities of future application in the future are also included in this report from the view point of researchers working for nuclear fusion development.

Editors : K. Koizumi, T. Konishi, H. Tsuji, Y. Okumura, T. Imai, M. Akiba, Y. Ohara,
M. Nishi, A. Hishinuma, H. Takeuchi, M. Kikuchi, T. Ozeki, Y. Kishimoto,
N. Hosogane, N. Miya, T. Abe, M. Kuriyama and T. Fujii

Although the nuclear fusion research has a characteristic to integrate the frontier technologies of various fields, the technology development for fusion devices contributes the progress of familiar industrial technologies, expedites the technology development of other research areas as a frontier technology, and energizes the basic science researches. It also has a high possibility to energize the development of whole science and technology in future. It should be noted that spin-off effects described in this report are not obtained by aiming at spin-off itself and by basic research. They are achieved by the continuous technology development toward the construction of fusion experimental reactor. It is expected that the spin-off of fusion technology development will be much accelerated through the fabrication of the ITER components and the ITER operation.

Keywords: Spin-off, ITER, SC Magnet, NBI, RF, PFC, Blanket, Remote Handling, Reactor Structure, Fuel Supply/Exhaust, Tritium, Material, Neutron Source, JT-60, Large Tokamak

目 次

1. 概要	1
2. 工業技術分野への波及効果	3
2.1 超伝導	3
2.1.1 超伝導の実用化技術	3
2.1.2 超伝導の利用可能技術	3
2.1.3 超伝導の共通技術	3
2.2 中性粒子入射 (NBI)	4
2.2.1 NBI の実用化技術	4
2.2.2 NBI の利用可能技術	4
2.2.3 NBI の共通技術	4
2.3 高周波 (RF)	4
2.3.1 RF の実用化技術	4
2.3.2 RF の利用可能技術	4
2.3.3 RF の共通技術	5
2.4 耐熱機器	5
2.4.1 耐熱機器の実用化技術	5
2.4.2 耐熱機器の利用可能技術	5
2.4.3 耐熱機器の共通技術	5
2.5 ブランケット	6
2.5.1 ブランケットの実用化技術	6
2.5.2 ブランケットの利用可能技術	6
2.5.3 ブランケットの共通技術	6
2.6 遠隔操作・炉構造	7
2.6.1 炉構造の実用化技術	7
2.6.2 遠隔操作・炉構造の利用可能技術	7
2.6.3 遠隔操作・炉構造の共通技術	8
2.7 燃料給排気	8
2.7.1 燃料給排気の実用化技術	8
2.7.2 燃料給排気の利用可能技術	8
2.7.3 燃料給排気の共通技術	8
2.8 トリチウム	9
2.8.1 トリチウムの実用化技術	9
2.8.2 トリチウムの利用可能技術	9
2.8.3 トリチウムの共通技術	9
2.9 材料	10
2.9.1 材料 (低放射化フェライト鋼) の実用化技術	10
2.9.2 材料 (低放射化フェライト鋼) の利用可能技術	10
2.9.3 材料の共通技術	10
2.10 中性子／中性子源	10

2. 1 0. 1	中性子／中性子源の実用化技術	11
2. 1 0. 2	中性子／中性子源の利用可能技術	11
2. 1 0. 3	中性子／中性子源の共通技術	11
2. 1 1	大型トカマク本体	11
2. 1 1. 1	大型トカマク本体関連の実用化技術	11
2. 1 1. 2	大型トカマク本体関連の利用可能技術	12
2. 1 1. 3	大型トカマク本体関連の共通技術	12
2. 1 2	大型トカマク関連電源	12
2. 1 2. 1	電力関連の実用化技術	12
2. 1 2. 2	電力関連の利用可能技術	12
2. 1 2. 3	電力関連の共通技術	12
2. 1 3	プラズマ実験関連データ伝送処理	12
2. 1 3. 1	データ処理実用化技術	13
2. 1 3. 2	データ処理利用可能技術	13
2. 1 3. 3	データ処理共通技術	13
2. 1 4	プラズマ計測	13
2. 1 4. 1	プラズマ計測実用化技術	13
2. 1 4. 2	プラズマ計測利用可能技術	13
2. 1 4. 3	プラズマ計測共通技術	13
3.	核融合研究の理工学的広がり	32
3. 1	超伝導	33
3. 2	NBI	33
3. 3	RF	33
3. 4	耐熱機器	33
3. 5	ブランケット	33
3. 6	遠隔操作・炉構造	33
3. 7	燃料給排気	33
3. 8	トリチウム	34
3. 9	材料	34
3. 1 0	中性子／中性子源	34
3. 1 1	大型トカマク建設、運転	34
3. 1 2	プラズマ計測、物理実験	34
3. 1 3	プラズマ物理	34
4.	まとめ	35

Contents

1.	Overview	1
2.	Spin-off to Industrial Technology	3
2.1	Superconducting (SC) Magnet	3
2.1.1	Spin-off for Practical Use	3
2.1.2	Applicable Technology	3
2.1.3	Common Technology for Future Use	3
2.2	Neutral Beam Injection (NBI)	4
2.2.1	Spin-off for Practical Use	4
2.2.2	Applicable Technology	4
2.2.3	Common Technology for Future Use	4
2.3	Radio Frequency (RF)	4
2.3.1	Spin-off for Practical Use	4
2.3.2	Applicable Technology	4
2.3.3	Common Technology for Future Use	5
2.4	Heat-resistant Component	5
2.4.1	Spin-off for Practical Use	5
2.4.2	Applicable Technology	5
2.4.3	Common Technology for Future Use	5
2.5	Blanket	6
2.5.1	Spin-off for Practical Use	6
2.5.2	Applicable Technology	6
2.5.3	Common Technology for Future Use	6
2.6	Remote Handling · Reactor Structure	7
2.6.1	Spin-off for Practical Use	7
2.6.2	Applicable Technology	7
2.6.3	Common Technology for Future Use	8
2.7	Fuel Supply/Exhaust	8
2.7.1	Spin-off for Practical Use	8
2.7.2	Applicable Technology	8
2.7.3	Common Technology for Future Use	8
2.8	Tritium	9
2.8.1	Spin-off for Practical Use	9
2.8.2	Applicable Technology	9
2.8.3	Common Technology for Future Use	9
2.9	Material	10
2.9.1	Spin-off for Practical Use	10
2.9.2	Applicable Technology	10
2.9.3	Common Technology for Future Use	10
2.10	Neutron/Neutron Source	10

2. 1 0. 1	Spin-off for Practical Use	11
2. 1 0. 2	Applicable Technology	11
2. 1 0. 3	Common Technology for Future Use	11
2. 1 1	Large Tokamak	11
2. 1 1. 1	Spin-off for Practical Use	11
2. 1 1. 2	Applicable Technology	12
2. 1 1. 3	Common Technology for Future Use	12
2. 1 2	Power Supply for Large Tokamak	12
2. 1 2. 1	Spin-off for Practical Use	12
2. 1 2. 2	Applicable Technology	12
2. 1 2. 3	Common Technology for Future Use	12
2. 1 3	Data Processing for Plasma Experiment	12
2. 1 3. 1	Spin-off for Practical Use	13
2. 1 3. 2	Applicable Technology	13
2. 1 3. 3	Common Technology for Future Use	13
2. 1 4	Plasma Diagnostic	13
2. 1 4. 1	Spin-off for Practical Use	13
2. 1 4. 2	Applicable Technology	13
2. 1 4. 3	Common Technology for Future Use	13
3.	Spin-off of Fusion Research Related to Basic Science	32
3. 1	Superconducting Magnet Technology	33
3. 2	NBI	33
3. 3	RF	33
3. 4	Heat-resistant Component	33
3. 5	Blanket	33
3. 6	Remote Handling · Reactor Structure	33
3. 7	Fuel Supply/Exhaust	33
3. 8	Tritium	34
3. 9	Material	34
3. 1 0	Neutron/Neutron Source	34
3. 1 1	Construction and Operation of Large Tokamak	34
3. 1 2	Plasma Diagnostic and Plasma Experiment	34
3. 1 3	Plasma Physics	34
4.	Summary	35

核融合研究開発の波及効果

まえがき

核融合開発は、広範な未踏技術の開拓を伴うため、先端技術のシーズ（種）としても重要な成果を上げつつある。すなわち、核融合装置は、物理学、電磁力学、熱力学、機械工学、電気・電子工学、材料工学、伝熱流動・熱工学、核工学、低温工学、化学工学、制御工学、計測工学、真空工学など、極めて広い学問分野に基礎をおき、それらの先端技術の集積により構成されている。このため、要素機器の開発に伴い個々の技術分野が進歩するだけでなく、分野間での相互刺激が科学技術全体のポテンシャルを高めることにも寄与している。その成果がもたらす波及効果は、半導体産業、大型精密機械加工などの一般民生用技術ばかりでなく、加速器技術、超伝導利用技術、計測診断技術、プラズマ応用技術、耐熱・耐重照射材料技術、真空技術、計算機シミュレーション技術など、物理、宇宙、材料、医学、通信、環境など、他の分野の先端技術開発や基礎科学研究の発展に多大の貢献を果たしている。本冊子では、これらの波及効果の現状を、他分野への応用の可能性を含め、核融合開発に携わる研究者の視点から取り纏めた。

1. 概要

核融合炉は、プラズマの生成やその安定な保持、及びプラズマ性能の向上のための機器、メンテナンスを行うための機器等、さまざまな工学機器から構成されている。核融合炉本体部の主要な工学機器とその役割を図 1-1 に示す。本報では、これらの核融合工学機器に関する研究開発の成果について、特に ITER 活動開始以降の成果の工業技術分野への波及効果を中心に調査・検討した。それぞれの技術について、

- 1) 実用化技術：既に原研の成果が産業界に利用されているもの。
- 2) 利用可能技術：原研の達成技術レベルが従来産業界で使われている技術を凌駕しており、成果が具体的に産業界に利用可能とみられるもの。
- 3) 共通技術：現在の開発技術が将来的に他分野に応用可能と期待できる共通基盤を持っているもの。

の3種類のカテゴリーに分けてまとめた。

カテゴリー1の実用化技術は、具体的には、特許またはそれに準ずる開発技術成果として、ライセンス契約等や商品化が行われているものがそれに該当する。あまり件数は多くはなく、派生技術とみなされる性格が強い。

一方、先端性、先進性の強い技術はカテゴリー2の利用可能技術であるが、実際使用された例は少ないか、または使われても他の特殊な研究開発分野であることが多い。これは一般に使用されるにはコストが高く、製造技術レベルが産業として成立するのには現状では困難であったり、使用実績からリスクが大きいなどの理由からであって、これら核融合の最先端の成果が産業界に浸透するためにはまだ長い期間が必要と思われる。

また、異なる分野の先端技術同士では、それぞれの特殊な技術要求のため特異な技術開発が進められており、技術波及の流れは一方から他方へとは決まっておらず、相互に影響しあっていることが多い。カテゴリー3の共通技術はそのような性格の技術であって、具体的な波及効果は将来可能性はあるものの現時点では明らかになっていない。

この他に、核融合研究の成果としては、工業技術としての波及効果の形ではなく、学問的に新しい知見理解、情報を得たり、基礎データとなったり、また既存の学問分野の新しい研究テーマとなってその分野を活性化する効果がある、あるいは新しい分野を開拓する可能性のあるものがあり、それらは核融合工学の理工学への広がりとして3章に簡単にまとめた。

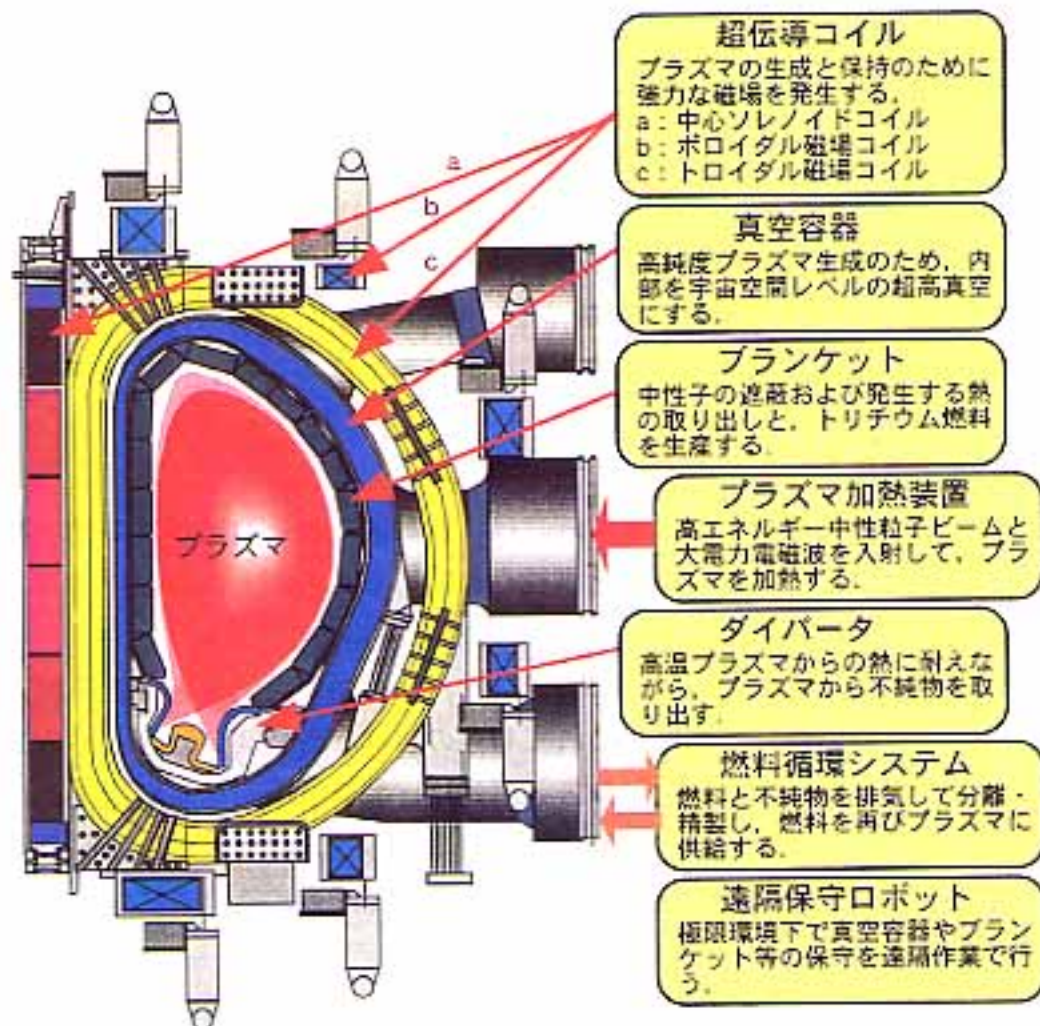


図 1-1 核融合炉本体部を構成する工学機器とその役割

2. 工業技術分野への波及効果

各工学技術分野の波及効果について、1章に示した3種のカテゴリーに分けて整理した。内容を以下に示す。

2. 1 超伝導

現在ITERを目的に開発している超伝導技術は、高磁場(13T)、大蓄積エネルギー(モデル・コイルでは約1GJ、実機では100GJ)、大電流(40~60kA)、低交流損失(従来技術に比較して1/5)の特徴があり(図2.1-1)、以下の分野への応用を飛躍的に拡大しうるものである。

2. 1. 1 超伝導の実用化技術

ITER用技術開発以前に原研が開発した技術を用いて、電流リード(図2.1-2)および4K以下で動作する熱効率の高い冷凍機用ヘリウムポンプ(図2.1-3)をCERN等に販売した実績がある。また、現在既に広く実用化されているニオブチタン超伝導マグネットは、過去の核融合開発において培われた技術に基づいている。構造材料の分野では、低温で従来よりも優れた強度を有する極低温構造材料が核融合のために開発され、実用化されている。

2. 1. 2 超伝導の利用可能技術

・電力貯蔵用超伝導磁石システム

現在のNEDO等で行われている電力貯蔵システム設計では最大磁場を5~6Tとしているが、ITERの13T技術を使うことにより同じエネルギーを1/2以下の大きさのコイルで蓄えることが可能となり、コンパクト化した貯蔵装置を都市近郊へ設置する可能性が高まる(図2.1-4、図2.1-5)。

また、大蓄積エネルギー超伝導コイルのクエンチ検出とコイル保護技術は、電力貯蔵用超伝導磁石システムに直接利用することが可能である。

・磁気分離システム

従来技術では2Tの磁場を用いた技術開発が進められているが、これを13Tへ高磁場化することにより、重金属や磁性を有する微粒子の分離・除去を高い効率で行える。

2. 1. 3 超伝導の共通技術

現在のところなし。

2. 2 中性粒子入射 (NBI)

ITER 用には、1MeV、40A の負イオン源を開発しているが、これは、従来の産業用のイオン源と比べて、図 2.2-1 に示すようにエネルギーで1桁以上、電流値で2桁から3桁大きい。ここで開発された高密度負イオン生成技術、大面積イオン源技術、高エネルギー加速技術（図 2.2-2）の波及効果として以下のものがある。

2. 2. 1 NBIの実用化技術

- ・メートル級の大面積イオン源は産業用のイオンビーム加工機（日立製作所のイオンビーム加工機：IML シリーズ）や大面積液晶製作用（日新電機のイオンドーピング装置：EXCEED2000A）のイオン源として応用されている。
- ・負イオン源技術は大強度陽子加速器計画などの大強度高エネルギー加速器の粒子源として利用されている。

2. 2. 2 NBIの利用可能技術

- ・高密度・大面積負イオン源は次世代の高速 LSI 回路基板である SOI (Silicon On Insulator) や太陽電池用シリコン薄膜の製作に利用されると期待されている（図 2.2-3）。

2. 2. 3 NBIの共通技術

- ・負イオンビームは基板の帯電問題を回避することが可能であり、従来正イオンビームを利用している半導体製造分野への応用が期待される。
- ・高密度大型プラズマ源は次世代の3次元イオン注入装置に応用することが期待されている。

2. 3 高周波 (RF)

高周波 (RF) 技術は、情報通信、加速器、放送機、食物加熱や工業加熱等、様々な産業に使用されている。ITER 用に開発しているジャイロトロンは従来技術に比べ、周波数や電力が、1～2桁大きい。

2. 3. 1 RFの実用化技術

- ・JT-60で開発した大電力のマイクロ波発振管（クライストロン）は現在、SPring 8 や高エネ研等の大型加速器用マイクロ波発振管に応用されている。

2. 3. 2 RFの利用可能技術

- ・JT-60用VHF帯のMW発振技術は、今後、大強度陽子加速器計画や IFMIF

(核融合材料開発用照射施設)で必要とされるイオン加速用の大電力発振技術に応用できる。

- ・ミリ波帯のジャイロトロン (10kW) は、これまで難しかった複雑な形状のセラミックの接合、焼結の装置として商品化されており、ITER 用ジャイロトロンの大型のプラントへの適用により、本格的な産業界への応用が期待される (図 2.3-1)。
- ・ミリ波マイクロ波は現在数 10 から 100 kW レベルで半導体材料や人工ダイヤモンドなど高機能新材料のプラズマ化学合成や表面加工に利用されており、ITER ジャイロトロン開発成果は、これらの大型プラントへの応用が期待できる。

2. 3. 3 RFの共通技術

- ・ミリ波の特徴を生かした高速情報通信、高分解能レーダー、宇宙レーダー (図 2.3-1)。
- ・宇宙太陽光発電のマイクロ波による地上へのエネルギー伝送 (図 2.3-2)。
- ・ミリ波によって可能となる衛星間のミリ波エネルギー伝送。
- ・ミリ波マイクロ波 FEL によるオゾン生成とオゾン破壊成分の分解によるオゾン層の修復、環境保護 (図 2.3-3)。

等への応用も将来は期待できる。

2. 4 耐熱機器

ダイバータなど極めて大きな熱負荷のかかる機器を目的として、炭素系の耐熱材料や高熱負荷除去技術が開発された。

2. 4. 1 耐熱機器の実用化技術

現在のところなし。

2. 4. 2 耐熱機器の利用可能技術

- ・開発されたアルミナ分散強化銅製スワール冷却管及びスクリュウ冷却管は、600℃以上でも使用可能な冷却管であり、高性能ボイラー用冷却管として注目されつつある (図 2.4-1)。

2. 4. 3 耐熱機器の共通技術

- ・耐熱・耐損耗材料の開発

ダイバータアーマタイル用に開発された炭素繊維強化炭素複合材料 (C/C材)

は、高温・高圧処理によって得られた高耐熱・耐損耗特性によりスペースブレーン用表面保護材、衛星用半導体熱シンク材料（金属材より軽量な材料として）として有望視されている。

- ・異種材料の接合技術及び高熱負荷の除熱技術

異種材料の接合技術や高熱負荷の除熱技術は、ダイオキシンなどを発生しない高温ゴミ焼却設備の耐熱構造などへの応用が期待できる。

2. 5 ブランケット

ブランケット製作技術開発では、高温等方加圧（HIP）接合法と鋳造法が開発されたが、従来の技術に比べて、10～100 倍の大きさの構造物が高い熱・応力負荷性能を保って製作可能となっており、複雑な構造でかつ熱・応力負荷の高い構造物を製作するために応用されている。

ブランケット照射技術では、従来にない方式の中性子検出器が開発されており、核分裂への応用が期待される。

2. 5. 1 ブランケットの実用化技術

現在のところなし。

2. 5. 2 ブランケットの利用可能技術

- ・異種金属間の高温等方加圧接合技術。

冷却管や異種材料などの多くの部品を広い面積にわたって接合できるため、発電用ガスタービン燃焼室の二重壁部の接合、大型液晶テレビのターゲット板製作、ゴルフクラブのヘッド製作に利用可能。

- ・冷却管内蔵構造体の鋳造製作技術

内部配管を設置した構造体の鋳造を可能とする技術で、エンジンなどの自動車部品やガスタービン関連部品の製造に利用可能と期待される（図 2.5-1）。

- ・自己出力型中性子検出器の開発とその応用

核融合炉のパルス運転を模擬する照射試験のために開発された熱中性子束検出器は小型化、高速応答、高感度で、各国の軽水炉及び試験研究炉の中性子検出器として使用が検討されている（図 2.5-2）。

2. 5. 3 ブランケットの共通技術

特になし。

2. 6 遠隔操作・炉構造

ITER 用遠隔操作・炉構造技術開発では、高いガンマ線環境下で長時間使用可能なモータ、潤滑材、電線、コネクタ、光学式ペリスコープ等の耐放射線性機器がされた。これらは、 $10^4 \sim 10^6 \text{ R/h}$ の照射環境下でこれまでの機器よりも 1~2 桁大きい集積線量まで使用できる耐放射線性能を有している。

2. 6. 1 炉構造の実用化技術

- ・高温・高放射線・真空用グリース（特許名：潤滑グリース、商品名：モレスコハイグリース GK-1）
- ・真空フランジ（特許名：真空フランジ、商品名：IPD フランジ）、ガスケット（特許名：ガスケット、商品名：IPD ガスケット）
が真空工業用として実用化されている。

2. 6. 2 遠隔操作・炉構造の利用可能技術

- ・計測・観察用ペリスコープの開発
 10^6 R/h という強度なガンマ線環境及び 250° C という高温下でも、mm レベルの高い観察能力を有する光学式ペリスコープを新規に開発。これは、原子炉、廃棄物保管等の観察・点検に適用可能で、極限環境下で精度の高いリアルタイムの点検・観察が可能（図 2.6-1）。
- ・複合型光ファイバの開発
レーザを伝送し、溶接・切断を行うと共に、溶接及び切断作業等のリアルタイム・モニタリングが可能な複合型光ファイバーを新規に開発。原子炉容器及び廃棄物等の溶接・切断及び観察作業、さらには医療用等のレーザ治療等に幅広く適用可能（図 2.6-2）。
- ・配管保守ツールの開発
曲がり部、枝管を有する配管内を自走して溶接、切断及び溶接部の検査を行う遠隔自動ツールを新規に開発。水、ガス等を含むあらゆる配管に適用可能で、作業員がアクセスできない配管内部からの検査及び溶接・切断を無人で高い品質で実施可能（図 2.6-3）。
- ・着色酸化アルミニウム被膜線量計（カラー線量計）の開発
 $10^4 \sim 10^6 \text{ R/h}$ の高線量率ガンマ線照射下で 10 MGy 以上の高集積線量までの測定が可能な線量計を開発。原子力関連機器や放射線作業時の被爆管理の他、医療品の放射線滅菌処理のマーカーとしても使用可能。
- ・低歪み溶接技術の開発
二重壁構造を、簡便にかつ精度良く製作する低歪み溶接方法は、一般圧力容器、

化学プラント貯槽類等に適用可能（図 2.6-4）。

2. 6. 3 遠隔操作・炉構造の共通技術

・耐放射線性機器の開発

強度なガンマ線環境下で長時間使用可能なモータ、潤滑材、電線、コネクタ等の機器が原子力、廃棄物処理、高温プラント、宇宙等の極限環境機器・部品に適用可能。

・ロボット計測・制御技術の開発

重量物の高精度ハンドリング、対象物の変形、かじり等に対応できるフィードバック制御、及び遠隔保守機器の動作をリアルタイムで監視でき、かつ実作業前に動作シミュレーションを行い適切な動作条件を見出す計測・制御技術が、あらゆる産業用ロボットに適用可能（図 2.6-5）。

・高面圧免震技術の開発

地震から大重量物を守る高面圧の大型免震要素及びその特性のリアルタイムモニタリング技術（開発途上）は、高層・大型ビル等の大型構造物の免震とその品質保証に適用可能（図 2.6-6）。

2. 7 燃料給排気

燃料給排気機器開発で得られた高真空技術は、真空技術分野で使用されている各種の真空装置の製作、管理維持の技術を提供している。

2. 7. 1 燃料給排気の実用化技術

- ・開発されたヘリカル溝型真空ポンプは、従来油回転ポンプしか対応出来なかった広い圧力範囲に渡り連続排気が可能なオイルフリー真空ポンプとして、半導体、太陽光発電用薄膜製造分野で利用されている（図 2.7-1）。
- ・開発された高分解能四重極質量分析器は、重水素とヘリウムを初めて分別測定可能な分析器であり、ヘリウム検出センサーとして市場販売されている（図 2.7-2）。
- ・開発された高精度真空熱天秤は、天秤センサーとして市場販売されている（図 2.7-3）。

2. 7. 2 燃料給排気の利用可能技術

特になし

2. 7. 3 燃料給排気の共通技術

- ・開発中のレール銃式電磁力推進法によるペレット（飛翔体）は、従来不可能であった $\text{km}/\text{秒}$ の速度に物体を加速するものであり、宇宙空間に高速度で浮遊する多数のデブリ（人工衛星やロケットの破片）、隕石などを模擬することができるため、長期間宇宙に滞在する宇宙空間実験室、探査機などの防護外壁材や外壁構造の開発に利用されることが期待される（図 2.7-4）。

2. 8 トリチウム

ITER 用トリチウム技術開発では、 10^7 のトリチウム除去係数を実現する分離精製技術と従来に比べて 10 倍以上高速のトリチウムガス分析技術が開発されており、核燃料再処理工場からのトリチウム放出量の低減、化学工業プラントのプロセスモニタリング等への適用が期待される。

2. 8. 1 トリチウムの実用化技術

- ・トリチウム水分解装置の特許は、その 8—ナインに達する高い（トリチウム）水分除去性能を利用して導体、材料などのための超乾燥ガス製造装置、酸素雰囲気制御装置として実際に市販されている。
- ・トリチウムを対象として開発したオイルフリー粗引きポンプが、半導体工業、ウラン濃縮などに利用されている。

2. 8. 2 トリチウムの利用可能技術（図 2.8-1）

- ・トリチウムの分離、除去技術は核燃料再処理、重水炉、軽水炉プラントの開発、運転に利用可能。具体的利用例はないが、ITER 水処理系は、再処理工場に適用した場合トリチウムの環境放出を確実に低減できる。
- ・光ファイバーを用いたラマン分光は、リアルタイム、遠隔、多点でサンプリング不要の分析方法であり、石油精製などの化学工業プラントのプロセスモニタリング、制御への適用が可能（図 2.8-2）。
- ・紫外線レーザーを用いたトリチウム除染技術は、高い清浄度を必要とする半導体ウエハーの表面洗浄等に応用が可能（図 2.8-3）。

2. 8. 3 トリチウムの共通技術

- ・トリチウムの分離、回収のために開発した技術として低温吸着、特に圧力スイング法やガス分離モジュール、パラジウム透過による分離装置がある。これらはすでに水素や他のガスの分離回収に使用されているが、核融合工学で開発された装置の高性能化の知見は、ガス分離工業に応用可能。
- ・多成分系の蒸留のシミュレーション、低温蒸留の開発成果、知見は他の物質を

対象とした蒸留工業に適用可能。

- ・トリチウムを対象に開発された水素吸蔵合金は水素の貯蔵に応用可能。
- ・グローブボックスや雰囲気浄化系の技術は、クリーンルームやバイオ関係設備に利用可能。

2. 9 材料

核融合炉の材料は、構造材料、機能性材料（電気絶縁材、計測制御材等）、耐熱材料（2. 4 参照）及び特殊材料（ブランケット増殖材等）に大別される。構造材料では、ブランケット用構造材料として中性子の重照射に耐える低放射化フェライト鋼が開発されているが、新材料が実用化されるためには長期の使用実績が必要となるため、波及効果が現れるには長時間を要する。一方、機能材料、特殊材料では、CFC コンポジット材は従来開発されてはいたが、核融合ではその熱伝導、耐熱性を改良してダイバータや第1壁に使用している。また、絶縁用セラミック、耐熱セラミック、電極材などに大型、特殊形状の部品が核融合技術によって製造されるようになった。

2. 9. 1 材料（低放射化フェライト鋼）の実用化技術

現在のところなし。

2. 9. 2 材料（低放射化フェライト鋼）の利用可能技術

- ・核融合炉ブランケット用構造材として開発された低放射化フェライト鋼は、従来のフェライト鋼に比べ、高温におけるクリープ強度と靱性の両物性値とも高いという優れた性能を有するため、高温高圧環境下で稼働する機器への適用が期待されている（図 2.9-1）。例えば、高温用ボイラーの圧力容器や高温用タービンブレードなどへ低放射化フェライト鋼を使用した場合、より高温での運転が可能となるため、熱効率の向上が期待される。また、核分裂炉の被覆管へ使用した場合には、運転温度を上げることが可能となるため、出力密度や耐久性の向上が期待される。

2. 9. 3 材料の共通技術

現在のところなし。

2. 10 中性子／中性子源

中性子／中性子源に関する技術開発では、核融合炉を模擬した強力中性子源の開発を目的とする大電流イオンビーム加速技術の開発と量子計測技術の開発が進めら

れている。大電流イオンビーム加速技術は、医療分野や RI 生産等への応用が期待される。

2. 10. 1 中性子／中性子源の実用化技術

現在のところなし。

2. 10. 2 中性子／中性子源の利用可能技術

- ・大電流イオンビーム加速技術は医療、RI 生産、非破壊検査に応用可能である（図 2.10-1）。また Li ループ技術は D-T 核融合炉ブランケットのみならず、将来宇宙ステーション用原子炉、月面用原子炉等の冷却材として、また高温用ヒートパイプなどへの技術基盤と成り得る。
- ・核融合強力中性子源で開発する 8 MeV-RFQ リニアックの技術は、ボロン中性子癌治療（BNCT）や PET 用ポジトロンエミッター等の有用な RI の効率的な生産が可能となる。

2. 10. 3 中性子／中性子源の共通技術

- ・ダイヤモンド中性子・放射線検出器は、優れた耐放射線特性や高温動作等の様々な特色を生かして将来の応用が期待されている（図 2.10-2）。

2. 11 大型トカマク本体

大型トカマクにおけるプラズマ実験に関連して、従来技術の範囲を出るいくつかの新しい技術が開発、あるいは実用化された。将来の核融合炉を目指した核融合工学研究とは若干異なり、このトカマク関連技術は現在の時点での達成度がそのまま利用レベルであるという点で、比較的実用化技術が多い。特に、開発当時は実現可能と思われても実例がなかったものが核融合研究研究が新たな需要となり、その後一般の産業、民生技術となったような事例も見られる。

2. 11. 1 大型トカマク本体関連の実用化技術

- ・大型トカマク装置は類例の極めて少ない超高真空容器であり、高温や粒子負荷、ガス供給のある点がスペースチェンバーよりも厳しい条件となる。真空、ガス供給関連の技術として、インコネル製真空容器、大口径フランジ、ゲートバルブ、金属中空Ｏリング、大容量ターボポンプなどが半導体工業や加速器などで使用されている。
- ・トカマクに精密に燃料ガスを供給するピエゾバルブは、半導体工業等で利用されている（図 2.11-1）。

- ・大型真空容器のリーク検出、探索のためのヘリウムスニッフア技術も他の真空一般技術への有用な波及である（図 2.11-2）。

2. 1 1. 2 大型トカマク本体関連の利用可能技術

現在のところなし。

2. 1 1. 3 大型トカマク本体関連の共通技術

現在のところなし。

2. 1 2 大型トカマク関連電源

トカマクプラズマ実験は様々な特殊条件で大きな電力を直流、交流、パルス、高周波として扱うため、電力電源技術についても特有な成果を得ている。一般の利用例は少ないが、電力供給側の技術に貢献した例が見られる。

2. 1 2. 1 電力関連の実用化技術

- ・トカマクおよびプラズマ加熱装置に電力を供給するために、大規模電源技術が開発された。中性粒子入射装置の 5 0 0 kV 直流電源はそのまま紀伊水道直流送電プロジェクトに使用された（図 2.12-1）。
- ・トカマク装置の多くは大型フライホイールをパルス電力の供給に使用しているが、この技術が電力揺動の安定化に使用された（図 2.12-1）。
- ・大電力サイリスタ電源と光ファイバーによるその監視技術は、北海道—本州直流送電システムに応用された。
- ・多数のケーブルから地絡箇所を検出する技術が一般に使用されるようになった（図 2.12-2）。

2. 1 2. 2 電力関連の利用可能技術

現在のところなし。

2. 1 2. 3 電力関連の共通技術

特になし。

2. 1 3 プラズマ実験関連データ伝送処理

プラズマ実験は短時間のパルスの間に多くの実験計測データを伝送、処理、格納する必要があり、その容量、速度共に最先端であったため、常に先駆的なユーザーであり続けてきた。

2. 1 3. 1 データ処理実用化技術

- ・現在一般に使用されているイーサネットや高速汎用バス、光—信号変換モジュール、分散処理システムは実用化初期からトカマク実験で使用されており、その後の普及の基礎となった。

2. 1 3. 2 データ処理利用可能技術

現在のところなし。

2. 1 3. 3 データ処理共通技術

- ・トカマク遠隔実験技術は最近の IT 技術の先駆的利用例である。
- ・大容量データ処理の標準化の為に導入した CAMAC システムは我が国での先導的な役割を果たした（図 2.13-1）。
- ・大容量データレコーダは、その後半導体メモリー技術に利用されている。

2. 1 4 プラズマ計測

プラズマ実験では、対象が高速、複雑な動きをし、スペクトルの全波長の電磁波を放出する一方、ノイズレベルが高く、放射線や高熱など過酷な条件が要求される特殊な計測技術が使用されている。

2. 1 4. 1 プラズマ計測実用化技術

- ・プラズマイオン温度測定用に開発されたマルチチャンネルプレートが実用化、市販されている。
- ・赤外レーザー偏光装置の産業応用が検討されている。

2. 1 4. 2 プラズマ計測利用可能技術

現在のところなし。

2. 1 4. 3 プラズマ計測共通技術

- ・光ファイバーフィードスルー、大口径ミラー、フレキシブルライトガイド、位相共役鏡など、光学測定技術の多くがその後の光通信利用、レーザー応用などの技術基盤となっている。
- ・高感度 CCD カメラは核融合実験のために性能を大きく向上させた。

ITER超伝導コイル技術の開発とその応用

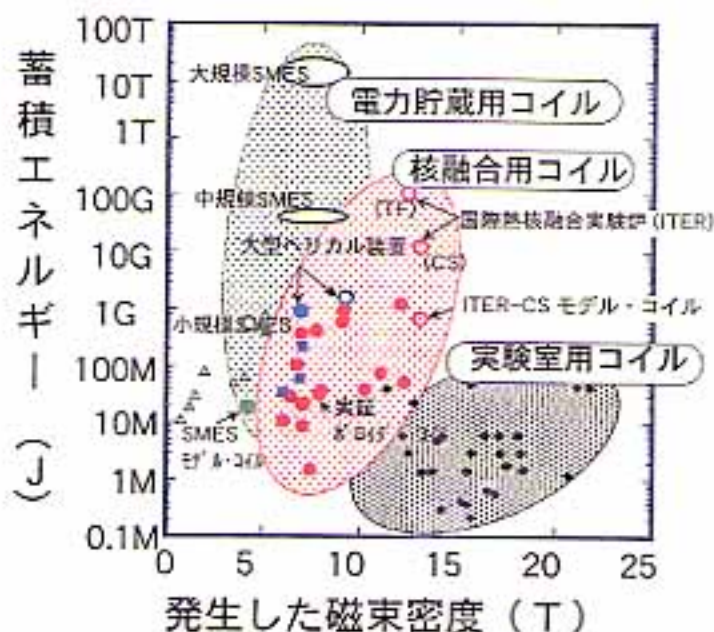


図2.1-1

開発される新技術

- ・高磁束密度 13T
- ・大エネルギー 100GJ
- ・大電流 40~60kA
- ・交流損失 従来の1/5

応用1 電力貯蔵システム

現在5~6Tで設計されているプラントの蓄積エネルギーが同一規模で5~7倍となる

応用2 磁気分離システム

種々の廃水に含まれる重金属イオンや微粒子を、従来式 (2T) より強力・高効率な処理が可能となる。

M9906230/HLT

高性能電流リード技術の開発と他分野への波及

①電流リードとは

室温(300K)の電源と4Kの超伝導コイルの間を接続する機器。原研と富士電機が共同して開発に成功し特許を取得。

②電流リードの実例

ITERモデル・コイル試験用
60kA, 30kVの電流リード

③他分野への波及

この日本で開発した電流リードの性能が欧州で高く評価されCERNの加速器用超伝導コイル・システムに採用され、良好に稼働中である。

M990531b/HLT

図2.1-2

冷凍機の技術開発成果の波及

成果1

4Kで動作する減圧ポンプ
で60%以上の熱効率を実現

(液体ヘリウムを4.2Kより低くする
ために、ポンプを用いて減圧し、
沸点を4K以下に下げる)

技術革新

4K未満の極低温発生が容易かつ
高効率に実現可能となった。

波及

フェルミ研究所(米国)と
CERN(欧州)の加速器用冷凍
機に本ポンプが採用された。

成果2

高熱効率(1/350以上)の
4K冷凍機技術を開発

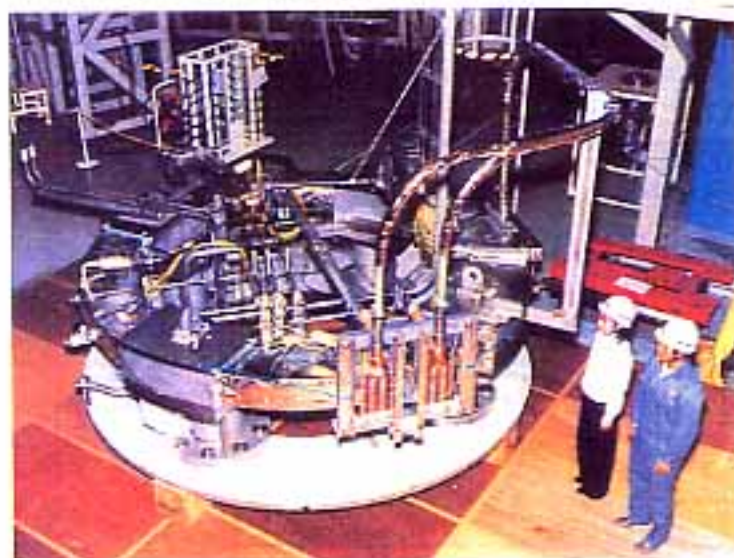
学術的波及

極低温熱工学において、高熱
効率化技術という分野を開く

図 2.1-3

電力貯蔵用超伝導磁石の現在

国際超電導産業技術研究センター(資源エネルギー庁)
と原研の共同研究として実験



実験は原研の
超伝導工学実験
装置を用いて実施

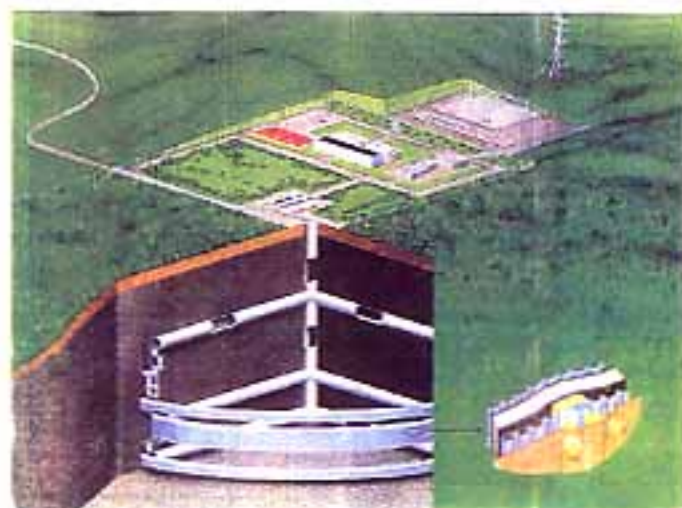
5kW × 1時間
相当のエネルギー
蓄積に成果

図 2.1-4

電力貯蔵用超伝導磁石の将来

夢

電力のピーク負荷を補うことにより
発電所の数を節約



NEDO設計

建設費=100万kW発電所1基分

500万kW
1時間の電力
ピークを吸収
でき100万kW
発電所5基分を
節約できる

差額=発電所4基分
=約1兆円

M990602a11.1

図 2.1-5

イオンビームの応用分野

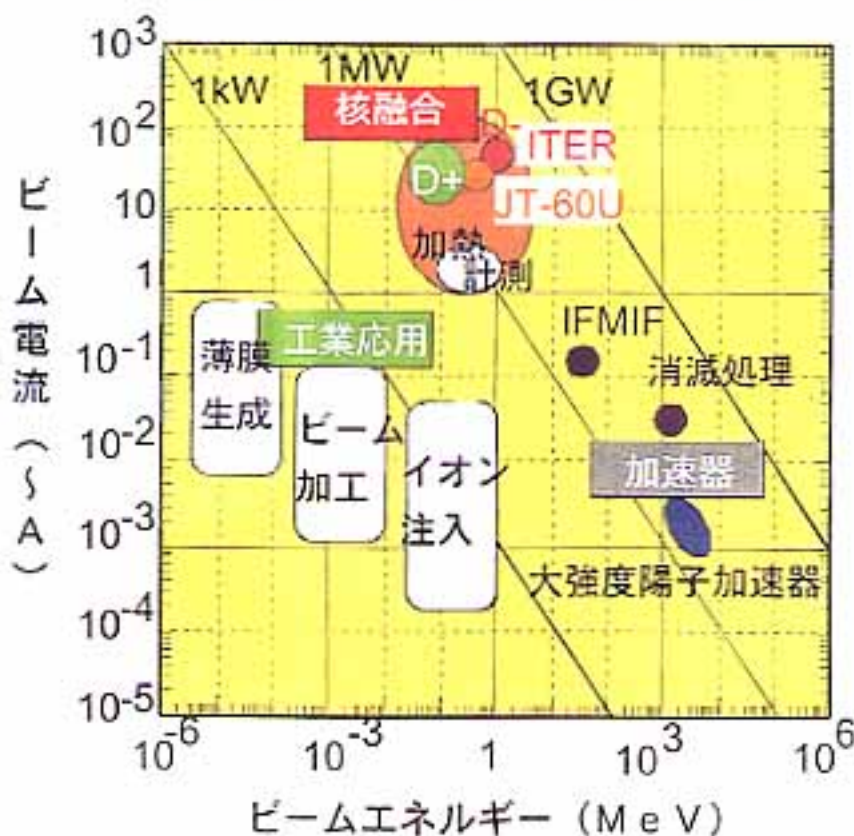


図 2.2-1

イオンビームの応用分野

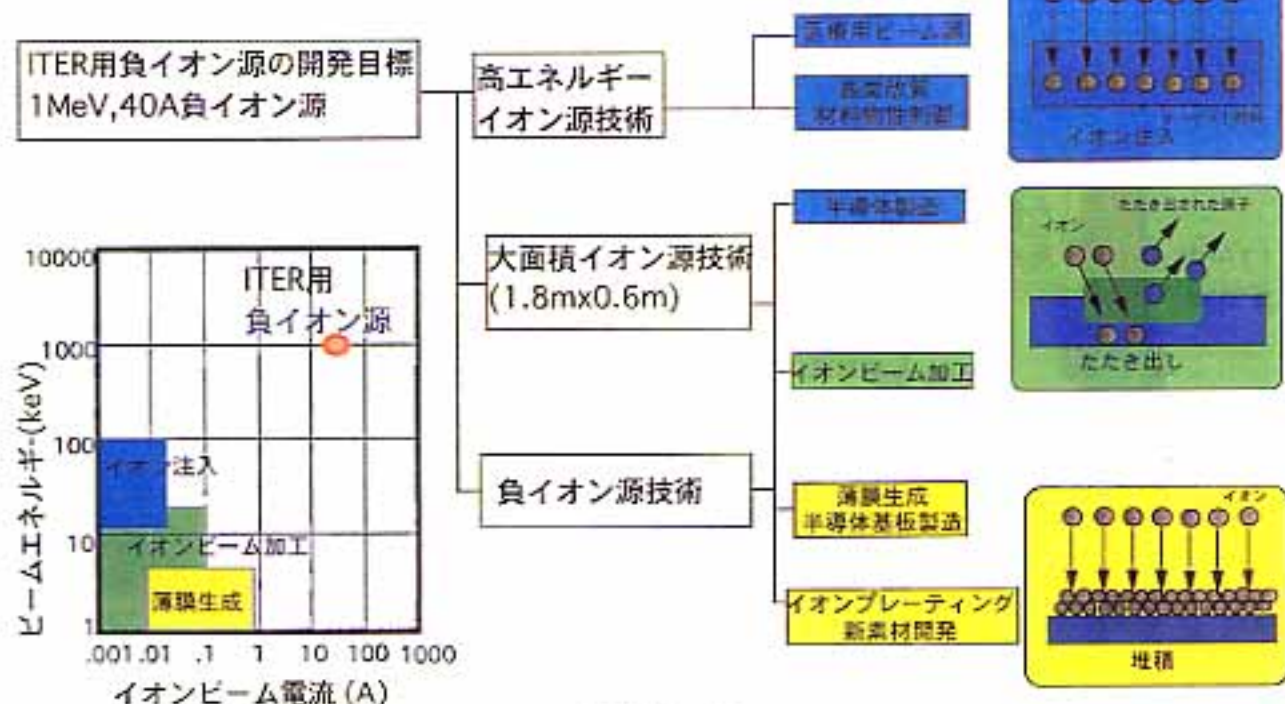


図2.2-2

高エネルギー水素負イオンビームによるシリコン薄膜製造技術

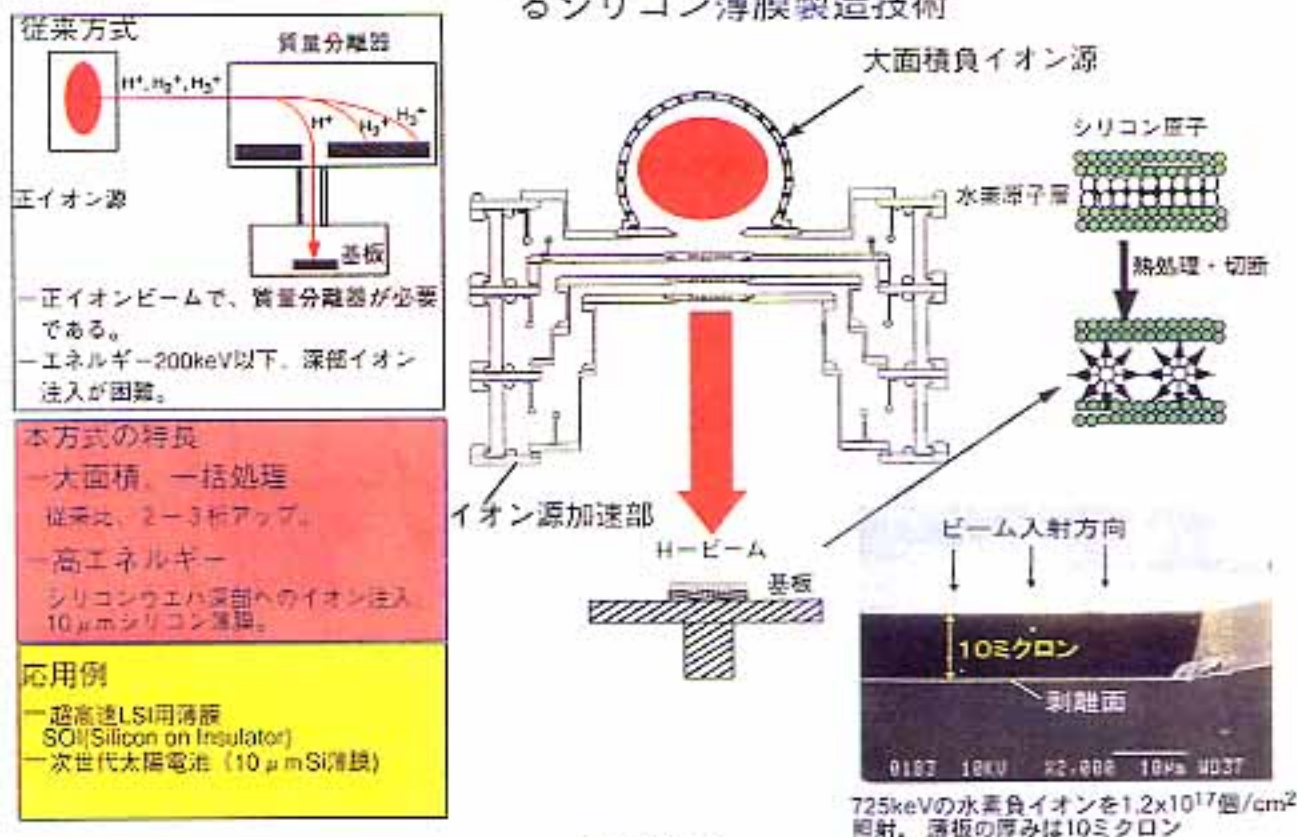


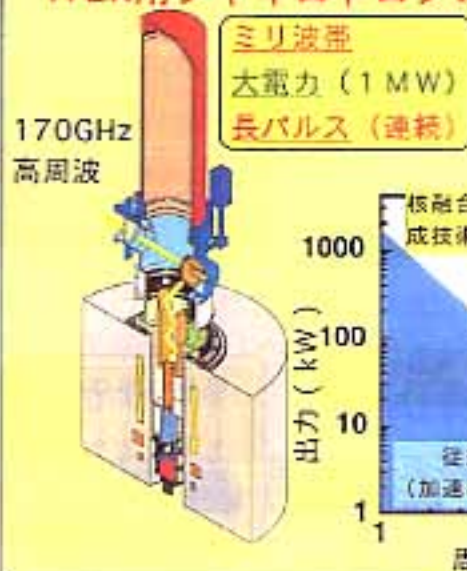
図2.2-3

核融合用RF源の開発と応用 1

ミリ波帯 (数百GHz)

波及効果

ITER用ジャイロトロンの開発



● 高機能セラミックスの焼結/接合、
高機能新材料合成、エネルギー伝送

● 高分解能レーダ
宇宙レーダ、環境保護



図2.3-1

核融合RF源の開発と応用 2

マイクロ波帯とVHF帯

波及効果

VHF帯: 放送機技術 → 核融合RF源開発

数十MHz, 数十kW級 → 100 MHz, 1MW級高周波源

イオン加速器用高周波源
(中性子科学、IFMIF材料試験装置)

150 - 200 MHz, 1MW 高周波源

マイクロ波帯:

JT-60用 クライストロンの開発
2GHz, 1 MW

波及効果

- スプリング 8 等の電子加速器用高周波源
- マイクロ波エネルギー伝送

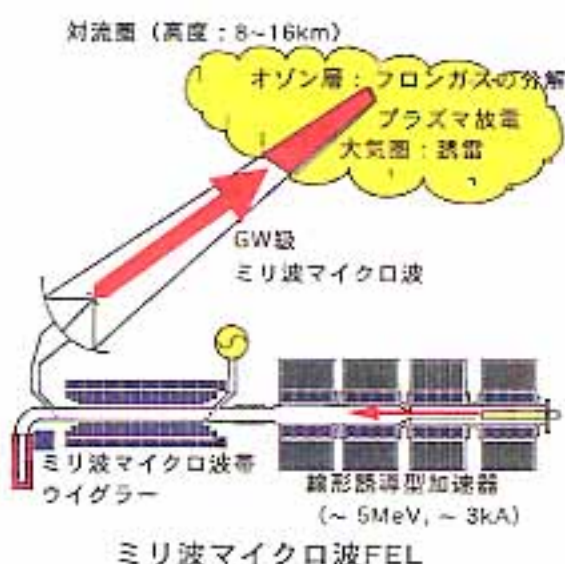


図2.3-2

核融合用RF源の開発と応用 3

ミリ波マイクロ波FEL

GW級ミリ波マイクロ波の高周波源の開発
(局所分布制御)



波及効果

- * 人工誘電/オゾン層修復
- * 高勾配加速器技術
- * 宇宙デブリレーダー/エネルギー伝送
- * 大気圏環境監視

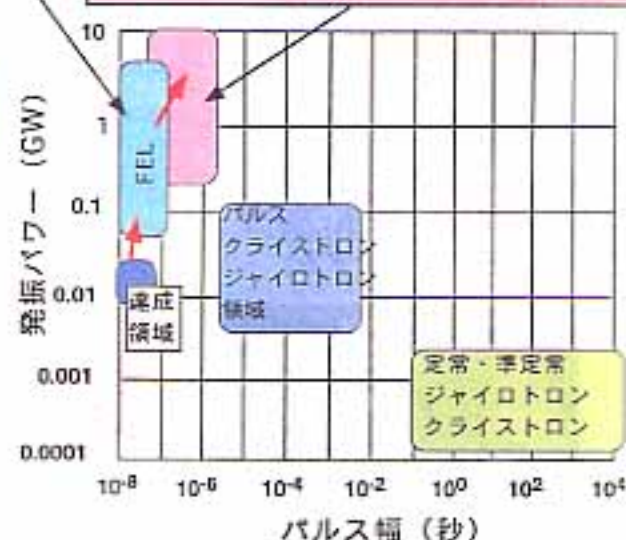


図2.3-3

高熱負荷除去技術

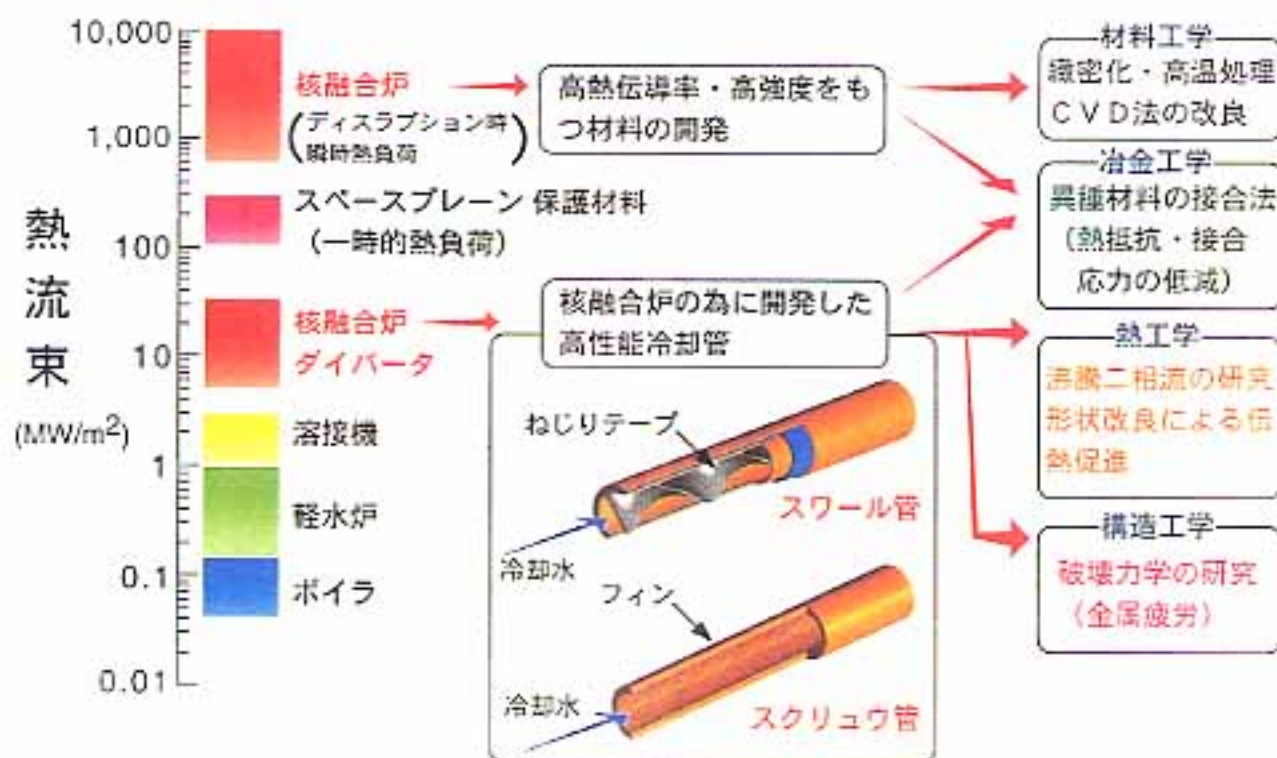
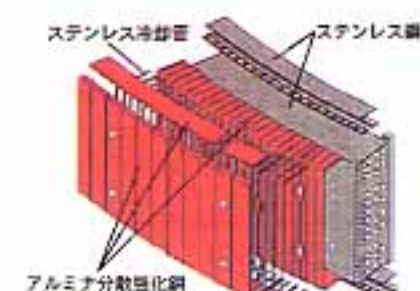


図2.4-1

ブランケット技術の波及効果

— 高温等方加圧による接合技術 —



各部品を仮組し、1050℃・1500気圧下で接合する。



世界で最大の大型異材接合構造体の製作に成功！
サイズ：幅1.6m、高さ1m、重さ3.5トン。



応用技術

高温等方加圧接合により、異なる材料を接合する新材料を創生することができ、かつ大型で複雑な形状した接合も可能。

応用例

ガスタービンの燃焼室、大型液晶テレビ、ゴルフクラブのヘッド、など

図2.5-1

自己出力型中性子検出器の開発とその応用

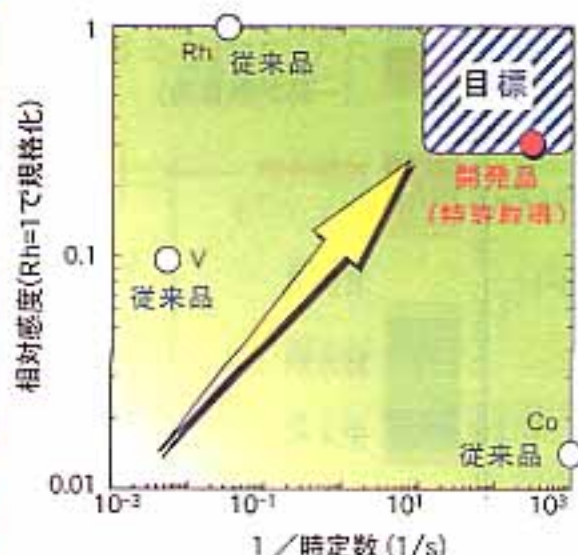
開発目標

- ・小型化 (ミッサ寸法 ϕ 3mm)
- ・高速応答 (時定数 <0.1 s)
- ・高感度 (Rhミッサ材出力の30%以上)

開発品の性能

- ・ミッサ寸法： $\phi 2.1 \times 50$ mm
- ・時定数： <20 ms
- ・感度：Rhミッサ材出力の約40%

各国の軽水炉及び試験研究炉で
使用を検討。



各種ミッサ材の応答及び感度特性

図2.5-2

極限環境下での高精度な点検検査を行う 光学式ベリスコープ

主な特徴

- ・200MGyのγ線に耐える耐放射線性
- ・200℃の高温で使用可能
- ・～mmレベルの観察性能

波及効果の例

- ・原子炉容器、廃棄物容器、一般大型容器等の内部観察に適用可能
- ・強度なガンマ線環境下での高精度でリアルタイムな観察が可能

ガンマ線
(1MR/h)
照射試験
の結果

標準ベリスコープ (約1時間で観察不能)



開発したベリスコープ (1mmの線幅を識別可能)



ITERで開発したベリスコープと観察性能



図 2.6-1

レーザを伝送し、溶接・切断と目視観察ができる 複合型光ファイバの開発

主な特徴

- ・レーザ伝送用ファイバによるレーザ溶接・切断が可能
- ・画像伝送用ファイバによる観察、計測及び溶接・切断のモニタリングが可能

波及効果の例

- ・原子炉容器、廃棄物容器等の溶接・切断作業に適用可能
- ・医療等のレーザ治療に適用可能

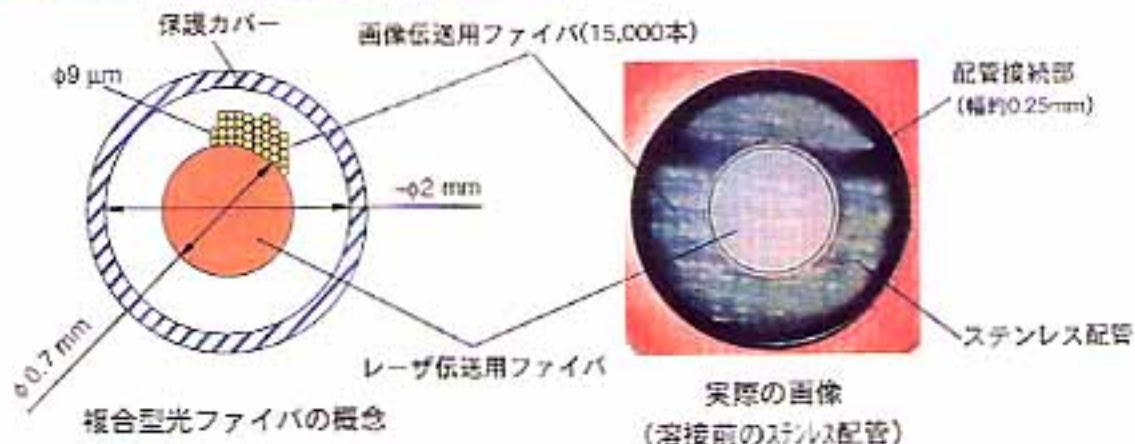


図 2.6-2

曲がり部、枝管を乗り越えて配管内を走行 自動で溶接・切断・検査を行うツール

主な特徴

- ・曲管、枝管のある母管内を自走
- ・自動で位置決め、芯合わせを行い、母管及び枝管の溶接・切断・検査を行う

対象配管：母管100mm（曲率400mm）、枝管50mm

性能：肉厚6mm～3mmの溶接・切断

光ファイバで2～4kWのYAGレーザーを伝送
毎分0.5mの走行、自動位置決め・芯合わせ

波及効果の例

あらゆる配管の内部観察・検査、
溶接及び切断に適用可能

- ・プラント各種配管、ガス・水配管等
- ・極限条件（狭い空間、複雑形状、放射線環境等）に対応
- ・自動開先確認・芯合わせにより品質の高い溶接・切断・検査
- ・全自動運転（無人化）により省力化、経済性が向上



曲管部通過状況

ITERで開発した管内を自走する溶接・切断ツール

図 2.6-3

T字継手の低歪み溶接法の開発

主な成果

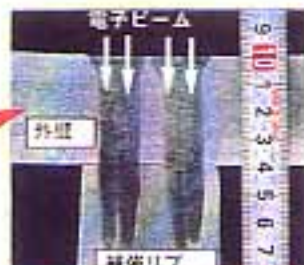
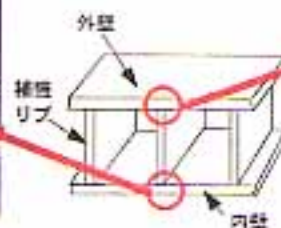
- ・溶接歪みを最小に抑えるT字継手の溶接方式の開発
- ・電子ビームによる斜め入射溶接
- ・電子ビームによる壁貫通溶接

波及効果の例

- ・T字継手を有する全ての構造物の製作に適用可能
 - ・外壁加工を省略して外壁とリブを接続できる壁貫通型は、製作コストを大幅に低減可能
- 適用例：工業用プラントの各種容器、橋梁、タンカー等の船舶



ITERで開発した水平入射型
電子ビーム溶接



ITERで開発した壁貫通型
電子ビーム溶接

図 2.6-4

ロボットシミュレーション・モニタリング技術

主な特徴

- ・マニピュレータ動作のリアルタイムモニタリングが可能
- ・シミュレーションによる軌道計画の立案が可能
- ・シミュレーションとフィードバックを組み合わせたロボット制御が可能



波及効果の例

あらゆるロボットの計測制御に適用可能

- ・産業、建設、原子力ロボット等
- ・シミュレーションとリアルタイムモニタリングにより複雑な作業（観察・据付・組立等）が可能
- ・ロボット作業の品質の向上
- ・省力化、経済性の向上

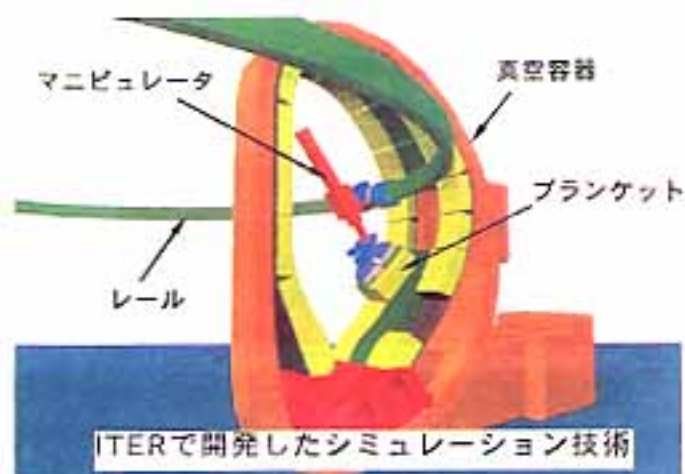


図2.6-5

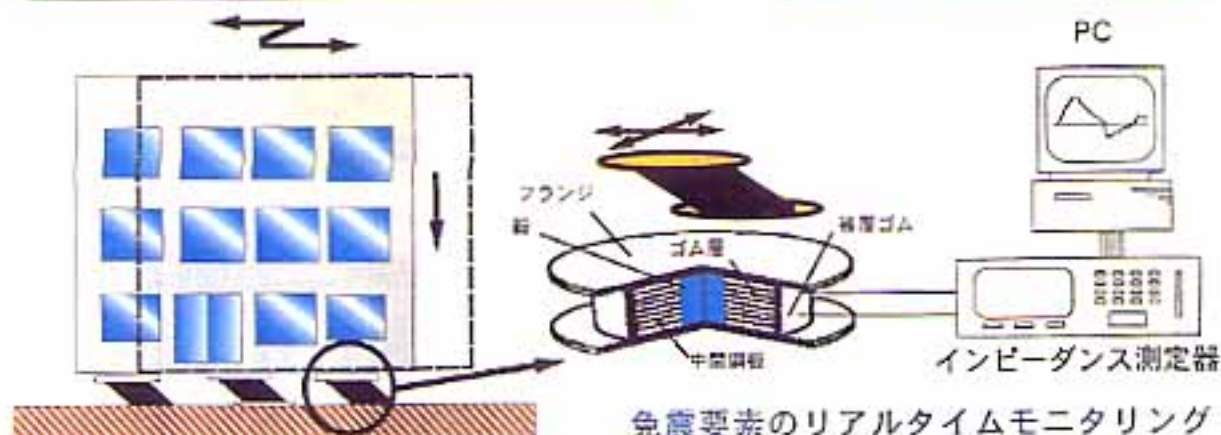
地震から大重量物を守る免震技術

ITERでの目的及び目標

- 目的：地震荷重を軽減しトカマクの健全性を担保する
 目標：大荷重（ $\sim 150\text{kg/cm}^2$ ）を支持し、地震荷重を0.2G以下にする免震要素（積層ゴム）
 免震要素の特性、経年変化をリアルタイムで監視

波及効果の例

- ・高層、大型ビルディングの免震
- ・大型で重量構造物の機器免震
- ・一般免震要素の特性及び経年変化のリアルタイムモニタリング



ビルディング免震の例

図2.6-6

ヘリカル溝型真空ポンプの開発

目的

高い水素圧力域で使用でき、清浄真空を確保できる真空ポンプの開発

- ・ 出口圧力 $> 200 \text{ Pa}$
- ・ 完全オイルフリー

ターボ分子型ポンプでは、この性能を原理的に満足できない



数値解析を駆使した最適ポンプ型の提案

ヘリカル溝型真空ポンプを採用

- ・ 水素出口圧力 1000 Pa 域で連続運転できる高速回転翼設計 (圧縮比 > 30)
- ・ 磁気浮上軸受採用

波及効果

従来、ターボ型ポンプでは、粒子の逆送現象により不可能といわれた水素出口圧 1000 Pa 域で動作する完全オイルフリーポンプが実現し、真空関連産業で多用されている。

回転数：27,000rpm



開発したヘリカル溝高速回転翼

応用

高い圧力の水素ガスを清浄環境下で連続排気しなければならない半導体および太陽光発電薄膜製造分野へ応用されている。

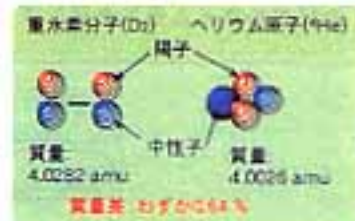
図 2.7-1

高分解能四極子質量分析計の開発

高分解能四極子質量分析計の必要性

- ① D-T核融合炉では、反応生成物の ^4He が炉心プラズマ中にたまり、核融合反応を維持できない
- ➡ 未反応燃料中の ^4He 濃度をモニターする必要

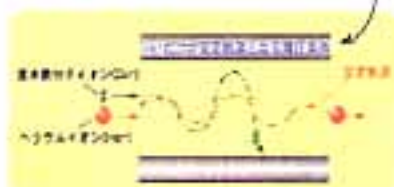
高分解能化 (D_2^+ と $^4\text{He}^+$ のわずかな質量差を区別)



動作原理



従来と全く異なる印加電圧条件で高分解能化を達成



波及効果

- ② 原研所有の特許に基づき、メーカーに技術移転し、同分析計を実用化

- ➡ D_2 中 ^4He の、各種材料における吸脱着実験等に活用されている

国内外に14台の販売実績

D_2^+ と $^4\text{He}^+$ を区別する様子



実用化された同分析計



図 2.7-2

真空熱天秤装置の開発

目的

真空熱天秤の製作及び同天秤による核融合炉内材料のガス吸収/放出量の絶対測定

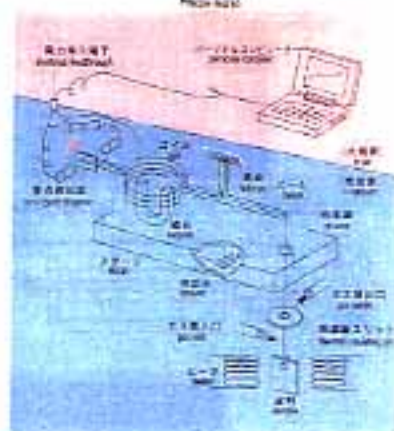
波及効果

従来、真空中のガス量は、相対値としてのみ計数されていたが、本真空天秤の実現により始めて分子個数として絶対計数できるようになった。そのため、ガス吸着/脱着過程の定量的研究に大きく貢献している。また、放出ガス量絶対計測による真空材料の品質管理へも応用されている。

応用

- a) Ti6Al4V材(低放射化材)など核融合材料の候補材のH₂吸収量の絶対測定
- b) インコロイ 908 材(超電導線のジャケット材)の酸素との化学反応性測定
- c) ウランなど蒸発した金属粒子の速度測定

【写真図】 Photo 4-2-1



天秤性能

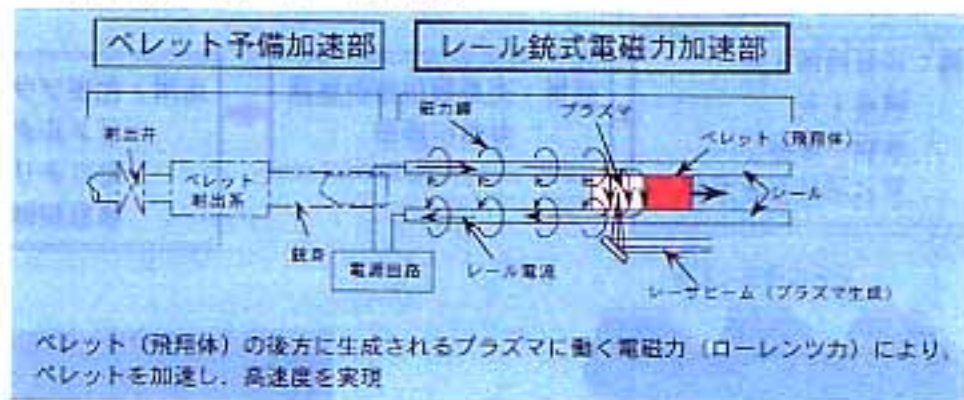
測定原理	: 電磁力平衡式
秤量(最大荷重)	: 20 g
検知最小質量(感度)	: 1×10^{-6} g
	(10^{-5} - 10^{-6} Pa, max. 900 °C)

図 2.7-3

ペレット（飛翔体）高速化技術の開発とその応用

開発目標

ペレット速度 = 数km/s ~ 10 km/s



波及効果

宇宙空間に浮遊する高速デブリ、隕石の衝突シミュレーター技術として、宇宙実験室、探査機の外壁材、外壁構造開発に応用

図 2.7-4

トリチウム技術の開発と応用可能な分野



図 2.8-1

レーザーラマン分析の応用

トリチウム分析技術

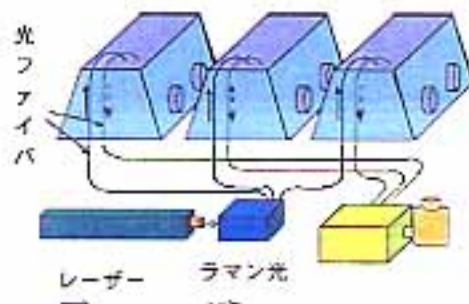
工業分析技術

特徴：応答時間 1 分
精度 1 %
遠隔、多点
サンプリング不要

成果：水素同位体の連続
分析に成功

応用：化学プラントの
リアルタイム
モニタリング
運転制御

グローブボックス



分析セル

図 2.8-2

紫外線レーザーによるトリチウム除染技術の応用

トリチウム除染技術

高い清浄度を必要とする表面の洗浄（半導体表面処理等）

特徴：大きいフォトン密度
（紫外線ランプの 10^8 倍）
短時間（数秒間）で洗浄
原子レベルまでの清浄度

成果：トリチウムを
含有する表面
堆積層の除去
に成功

応用：半導体ウェハの
表面洗浄等に応用
可能



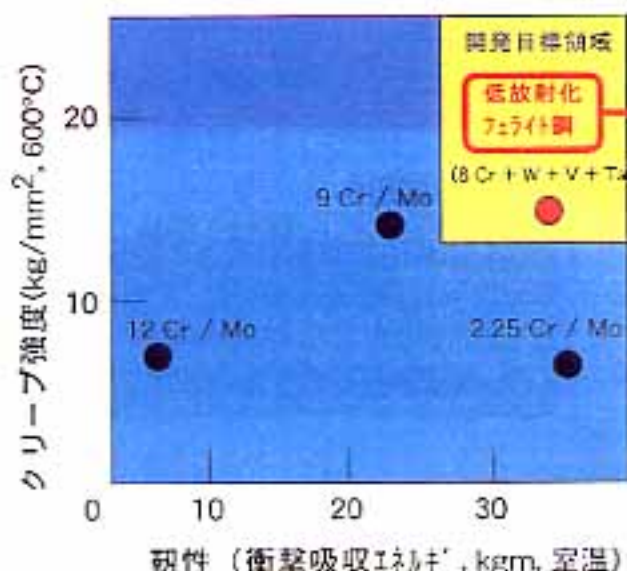
紫外線レーザーを照射し共堆積層が除去されたところ



図2.8-3

核融合炉構造材料開発とその応用

一般工業技術への応用



- ・高温用タービン
- ・高温用ボイラ

核分裂炉への応用

- ・燃料被覆管
- ・炉内構造物
 - 被爆量の低減
 - 高レベル廃棄物の減量

図2.9-1

核融合強力中性子源用加速器の技術開発

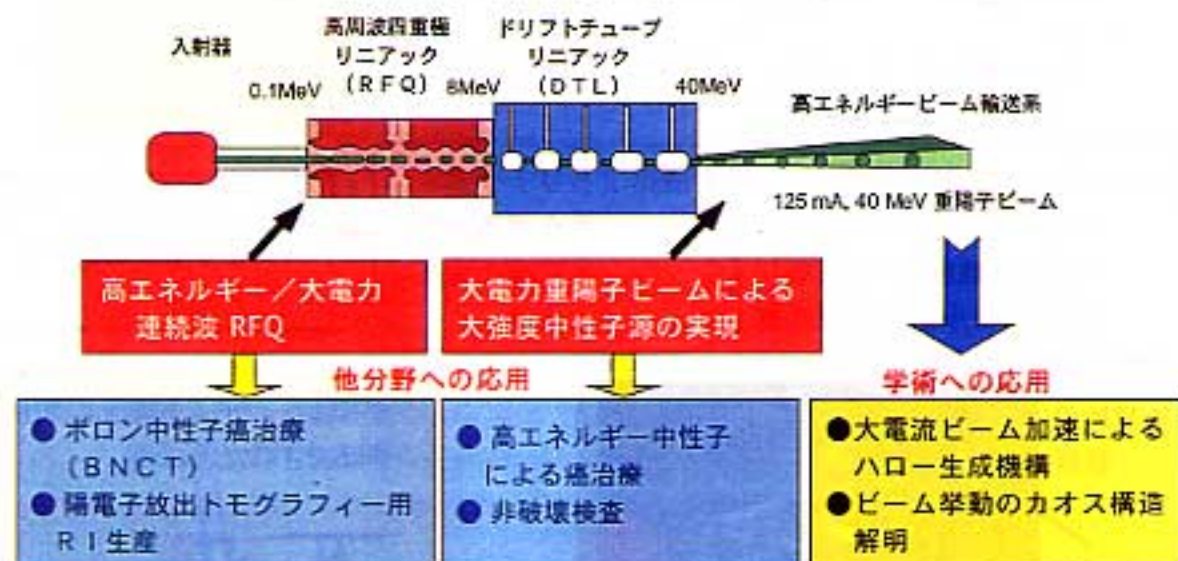


図 2.10-1

人工ダイヤモンド放射線検出器開発とその応用

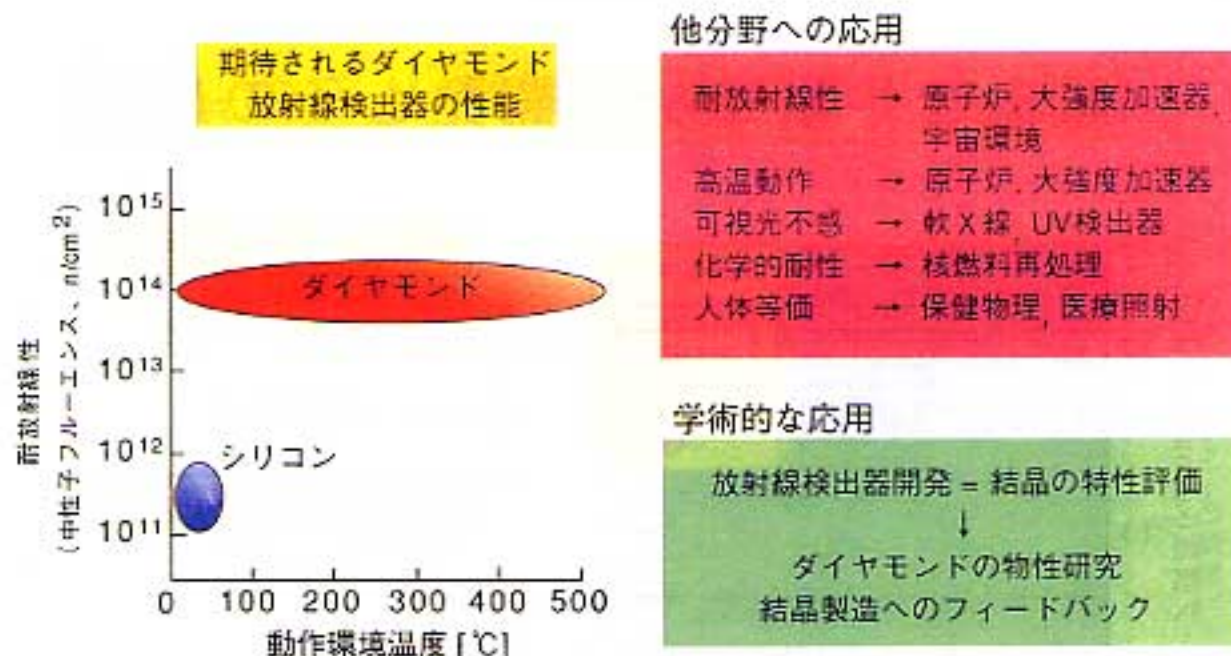
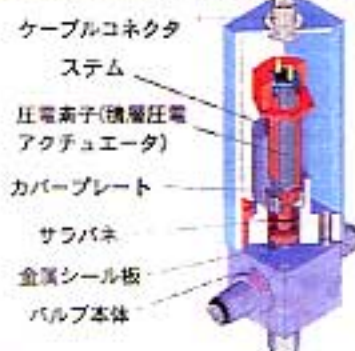


図 2.10-2

プラズマ粒子補給のためのガス注入弁の開発

JT-60におけるガス注入弁

圧電素子を利用したガス注入弁 積層圧電アクチュエータバルブ



仕様

流量(H₂): H弁 4.5~45Pa³/s
L弁 0.5~5.8Pa³/s
背圧 : 0.2MPa
駆動源: 圧電素子

動作速度: 10ms
動作電圧: 0~150V
シール材: NBR

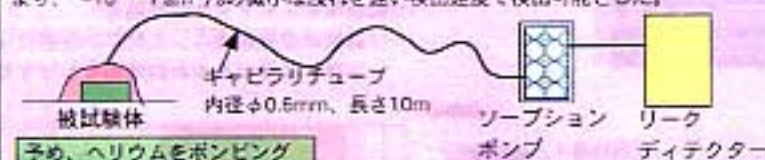
応用分野

半導体製造の成膜用ガスの制御等
微量ガスの制御に利用可能

図2.11-1

一真空技術分野における波及効果一

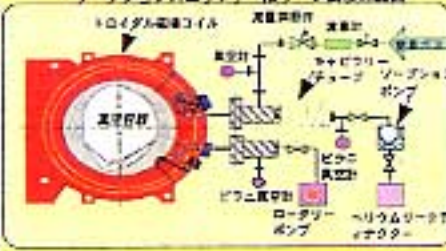
リークディテクターと被試験体の中間に長い毛細管（キャピラリチューブ）からの空気導入速度を $\sim 0.1 \text{ Pa}^3/\text{s}$ 程度まで安定に増加し、検出部の前段にソーブションポンプを設置することにより、 $\sim 10^{-11} \text{ Pa}^3/\text{s}$ の微小な流れを速い検出速度で検出可能とした。



JT60での開発

真空容器の工場製作段階において実用化して実証しており、その後、真空部品以外（トロイダル磁場コイル冷却管流れ検知に使用し、用途の広範囲なことを示した。

ソーブションポンプ・流リーク試験系図



一般産業界での利用

- 自動車部品（ラジエータ、エアサス、ショックアブソーバ）
- 空調部品（配管弁、コンデンサ、エバポレータ）
- 防水時計、等の製品（部品）検査に利用されている。

量産体制の中で容易で高速で行える気密試験として活躍している。



他にも、食料品の分野においてパック等の気密性能（品質維持）等に応用可能

図2.11-2

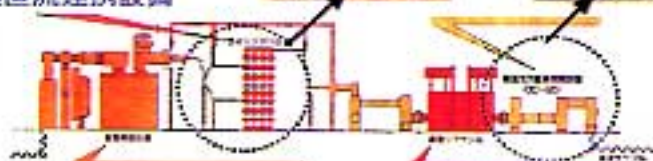
高電圧大電流電力の変換制御技術

- JT-60コイル用および加熱電源技術の応用 -

半導体電力変換技術

サイリスタ変換
器の制御技術直流高圧母線の
ガス絶縁技術JT-60には、50万ボルトの高圧
電源や、10万アンペア以上の大
電流電源技術が駆使されている

電源開発の紀伊水道直流送電設備

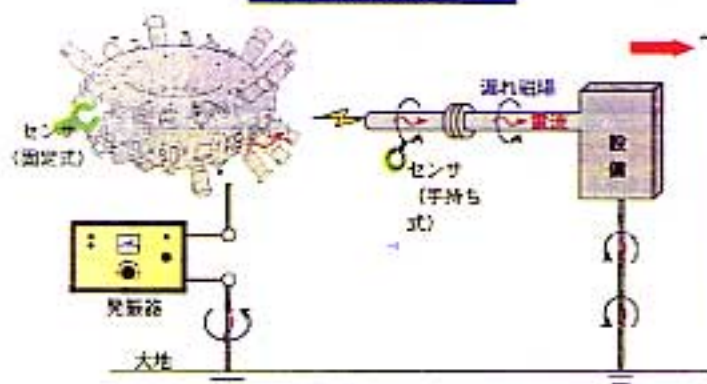


電気エネルギーを、巨大な独楽の蓄える

JT-60のフライ
ホイール付き
発電機沖縄電力のフライ
ホイール付き発電
機は、電力系統の
安定化に寄与

図2.12-1

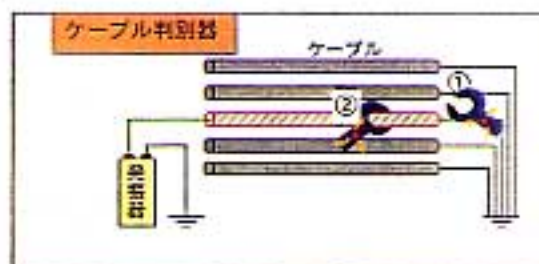
- 漏れ磁場から探査する絶縁異常検出法 -

絶縁異常箇所の検出方法
(地絡箇所探知器)→絶縁異常によりできた閉回路に
低周波の電流を流し、右ねじの法則により
導体が発生する漏れ磁場をセンサで検出する

- ①真空容器と大地間の回路に発振器より低周波の微小電流
(982.5Hz, 10mA) を流す。
→絶縁異常部を通して設備に電流が流れる。
→交流電流が流れている設備近傍には、交差磁場が発生する。

- ②固定式センサにより異常場所を調査。
→概略交流磁場の強い場所を決定する。

- ③実際の絶縁異常場所を手持式センサにより発見する。

ケーブルビットに張り巡らされているなど、多数
且つ、長いケーブルの束から特定のケーブルを
調査する。

- *①センサ先端を開口して概略位置を探索（地絡
箇所探知器の原理を応用）し、
②故障はケーブルをクランプして特定する。

図2.12-2

—大規模制御システムにおけるCAMACモジュールの適用— CAMAC: Computer Automated Measurement And Control の略称

CAMACモジュールとは？

プラントのデータ収集と制御のために
世界中で共通に使える小さな制御機器

CAMACモジュールの特徴

- ・システムの変更・拡張が容易
- ・故障してもすぐ部品の交換が可能

“モジュールがぎっしり詰まった”クレート



コンピュータが組み込まれた”モジュール”



JT-90プロジェクトでは、大量に
CAMACモジュールを複雑なシス
テムの制御に使用
(1985年に完成)



モジュール台数、約2000台



最近の”IT革命”（高速、大容量）を支える技術の出発点

1980年代～現在は、以下のように様々な分野で使用されている

加速器、医療



スペースシャトル



工場（製鉄所など）



図 2.13-1

3. 核融合研究の理工学的広がり

核融合の開発には、プラズマの生成・制御、その閉じ込め、それらを測定する計測技術と共に、強い磁場を作る超伝導コイル、炉心空間をつくる真空容器、核融合エネルギーを熱に変換するブランケット、プラズマを高温にする加熱装置などどれもがこれまでにない先端的な技術開発を必要とするため、図3-1に示すように極めて広い学問分野に基礎をおき、それらの科学技術の集積により構成されている。他方これら核融合技術の進展は根っこの基礎科学・理工学を刺激し、科学技術全体の活性化と発展を促すものである。核融合工学として原研で創出された成果が、既存のあるいは新しい理工学分野の活性化を促してきた、あるいは学術分野の進歩を促してきた、と考えられるものも多い。本章では、核融合工学の理工学分野と学術分野への今後の広がりについて、その可能性を含めた事例を挙げる。



図3-1 核融合の開発を支える科学技術

核融合は、最先端技術の集積により構成されるだけではなく、根っこの基礎科学・理工学を刺激し、科学技術全体の活性化と発展を促している。

3. 1 超伝導

- ・冷凍機の高効率化に関して、熱力学、熱工学。
- ・低温材料（オーステナイト）に関する研究で、低温材料物性、材料力学。
- ・大電流（低電圧）に関する電気工学。

3. 2 NBI

- ・イオン源のアークプラズマについて、電気工学（イオン工学）、イオンと表面の相互作用、原子分子素過程、プラズマに関する物理。
- ・高電圧、放電、サージ対策に関する電気工学、過渡現象の物理。

3. 3 RF

- ・高周波を使用する加速器工学。
- ・ジャイロトロン中での荷電粒子と電磁波の相互作用に関する物理、及び電磁力学。
- ・高周波の発生や変調、伝送に関する電子工学。
- ・高周波放電に関する放電工学。

3. 4 耐熱機器

- ・伝熱流動に関する熱工学、機械工学、化学工学。
- ・炭素繊維強化炭素複合材料（CFC）の材料工学。

3. 5 ブランケット

- ・高温等方加圧（HIP）接合に関する冶金、金属工学。

3. 6 遠隔操作・炉構造

- ・電磁構造に関する構造力学、ボルト締結に関する材料力学。
- ・柔軟構造の地震による振動に関する建築、土木工学。
- ・ロボット、特に大型、精密にかかる機械工学。
- ・シミュレーション制御に関する計測制御工学。
- ・耐放射線性材料に関連した材料工学。
- ・耐放射線性機器に関連した宇宙工学。
- ・溶接技術についての金属、冶金工学。

3. 7 燃料給排気

- ・真空、残留ガス計測に関した真空工学、計測工学

3. 8 トリチウム

- ・トリチウムプロセッシングに関連した電気化学、物理化学。
- ・トリチウム分析に関連した分析化学。
- ・ガス分離、膜分離、充填塔、蒸留などの分離に関する化学工学。
- ・伝熱、流動に関する化学工学。

3. 9 材料

- ・材料開発に関連した冶金、金属、材料工学。
- ・照射損傷に関する基礎的な物理過程、固体物理。

3. 10 中性子／中性子源

- ・原子分子素過程、基礎物理。
- ・加速器工学
- ・中性子、放射線計測などの物理、応用物理。

3. 11 大型トカマク建設、運転

- ・大電力に関連した電気工学。
- ・真空工学。
- ・巨大な電磁力に対する材料力学、機械工学。
- ・プラズマ制御、データ処理に関連した計算機工学、情報工学。

3. 12 プラズマ計測、物理実験

- ・プラズマ関係諸量計測に関連した電気工学、電子工学。
- ・レーザ、粒子計測に伴う応用物理、応用光学、電子工学、計算機工学。

3. 13 プラズマ物理

プラズマ物理それ自体は独立した学問分野であり、物理学や流体力学の範疇で扱われることも多い。物理学としてのプラズマ研究の意義は本論の対象の範囲外であるが、プラズマ研究それ自体が、固体物理、統計力学、地球・宇宙物理などと影響を及ぼしあいつつ、学問分野の拡大に貢献していることは指摘される。

4. まとめ

核融合工学は、先端性の強い工学技術をシステム化する性格が強いが、

- ・身近な工業技術への波及
- ・先端技術としての他分野への影響、
- ・基礎的な学問の活性化

のそれぞれについて大きな成果をこれまでにあげてきたこと、及び今後、科学技術全体の活性化と発展を促す可能性をもっていることが認識される（図4-1）。

これまでに得られている成果は、波及効果や基礎的な研究を目的としてあげられたものではなく、核融合実験炉という具体的な目標のための研究開発の結果として発生したものであることに留意する必要がある。つまり、このような技術的求心力のある装置があり、その先端的な目標に向けた技術開発があつて初めて、多くの関連した技術分野に波及するのであつて、小規模な奇を衒った開発によって広範囲の波及技術が発生するものではない。今後、ITERの実機の製作、運転を行う段階では、より一層こうした波及技術の発生は加速するものと期待できる。

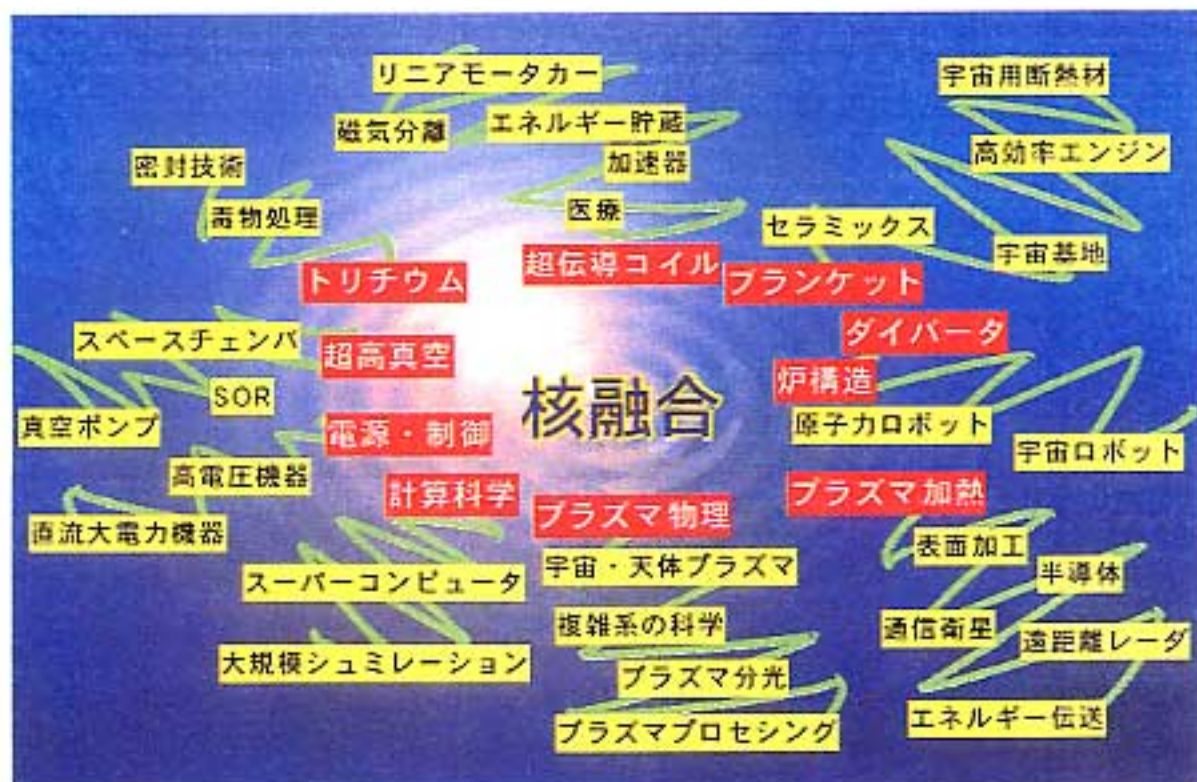


図 4-1 産業及び学術分野への核融合技術の広がり