

9:30～9:45 バイオリン演奏 加藤 菜津子

9:45～10:00 趣旨説明
ジャーナリスト 立花 隆

10:05～10:10 機構長挨拶
自然科学研究機構長 志村 令郎

10:10～10:40 オーバービュー
宇宙エネルギーの源—核融合エネルギーの実用化への道
核融合科学研究所長 本島 修

[第1部 宇宙の核融合]

10:40～11:10 私たちに最も近い星・太陽と、地球とのつながり
国立天文台 桜井 隆

11:10～11:40 ニュートリノで探る太陽
東京大学宇宙線研究所 鈴木 洋一郎

11:40～12:00 地上の太陽から宇宙を探る
核融合科学研究所 加藤 隆子

12:00～13:10 休憩

[第2部 地上の核融合]

13:10～13:20 導入 立花 隆

13:20～14:00 一億度のプラズマを閉じ込める
核融合科学研究所 山田 弘司

14:00～14:20 一億度にプラズマを加熱する
核融合科学研究所 竹入 康彦

14:20～14:40 核融合、そして、地球のための超伝導技術
核融合科学研究所 柳 長門

14:40～14:50 休憩

14:50～15:20 レーザー核融合から新しい宇宙物理学の誕生へ
大阪大学 高部 英明

15:20～15:50 核融合から21世紀の産業技術へ
核融合科学研究所 佐藤 元泰

15:50～15:55 まとめ 立花 隆

15:55～16:05 休憩

[パネルディスカッション]

一万年続く高度文明は存在するか？

司会:葛西 聖司(NHKアナウンサー)

パネリスト:立花 隆、松本 零士(漫画家)、海部 宣男(前国立天文台長)、本島 修

17:10～17:15 閉会の挨拶 本島 修

※各講演の終了後、5分間で立花隆先生と講演者との対談を予定しております。
※その他、パネル展示も行います。

※プログラムは一部変更となる可能性があります。

宇宙の核融合・ 地上の核融合

主催—大学共同利用機関法人
自然科学研究機構
後援—朝日新聞社/NHK

プログラムコーディネーター

立花 隆

東京国際フォーラムホールB5

東京都千代田区丸の内3-5-1

2007年3月21日[水・祝]

9:30▶17:15

自然科学研究機構ホームページ

<http://www.nins.jp/>

NINS
National Institutes of Natural Sciences

導 入

9:30 ~ 9:45

バイオリン演奏
加藤菜津子

9:45 ~ 10:00

趣旨説明

ジャーナリスト 立花 隆

10:05 ~ 10:10

機構長挨拶

自然科学研究機構長 志村 令郎

10:10 ~ 10:40

オーバービュー

宇宙エネルギーの源 核融合エネルギーの実用化への道

核融合科学研究所長 本島 修



しむら よしろう
志村 令郎

自然科学研究機構 機構長

1958年京都大学大学院理学研究科修士課程修了。63年米国ジョーンズホプキンス大学医学部研究員、67年大阪大学微生物病研究所研究員、69年京都大学理学部助教授、85年京都大学理学部教授、89年岡崎国立共同研究機構基礎生物学研究所教授（併任、～94年）、96年京都大学名誉教授、同年生物分子工学研究所所長、2001年独立行政法人日本学術振興会ストックホルム研究連絡センター長を経て、2004年より現職。専門は分子生物学。



たちばな たかし
立花 隆

ジャーナリスト

1964年東京大学仏文科卒業。同年文藝春秋社に入社。66年文藝春秋社退社。同年東京大学哲学科に入学、フリーライターとしての活動を開始する。95～98年先端科学技術研究センター客員教授。96～98年東京大学教養学部非常勤講師として、第一次立花ゼミ「調べて書く」ゼミを開講。2005年東大特任教授就任を機に、第二次立花ゼミを現在開講している。ジャーナリスト・評論家として多くの著作をもつ。

宇宙エネルギーの源 核融合エネルギーの実用化への道

自然科学研究機構 核融合科学研究所 **もとしま おさむ**
本島 修

地上に暮らす私たちは太陽エネルギーの恩恵を平等に受けています。そして、太陽に限らず、宇宙に輝く星たちのエネルギーの源は、全てが核融合反応により産み出されています。私たちは、地上で人工的に核融合反応を起こさせて地上にミニ太陽を作り、それをエネルギー源として活用する研究を精力的に進めています。

核融合エネルギーは、地球環境に影響を与えるとされる炭酸ガスを排出せず、無尽蔵に存在する海水の中の重水素を燃料資源とするため、安全で環境にやさしい恒久的なエネルギー源として、大きな期待が寄せられています。しかし、宇宙ではいたるところで起こっている核融合反応も、それを地上で起こすことは容易ではありません。地上に核融合エネルギーを実現するためには、私たちは宇宙の核融合エネルギーの源を理解することはもちろん、科学と技術に関わる幾多の困難を乗り越えて行かなければなりません。

核融合反応を起こすためには、燃料となる原子核どうしを非常に勢いよく衝突させる必要があります。そのためには、燃料物質を密度が100兆個/ccの状態で一億度といった超高温状態に保つ必要があります。そのような超高温状態では、物質は皆「プラズマ」と呼ばれる状態になります。プラズマの世界を支配する科学とは一体どのようなものなのでしょうか？宇宙に輝く太陽は、プラズマ物理学分野の様々な情報を数十万年から数十億年といった壮大な時間スケールで私たちに見せてくれます。太陽の中心で起きる核融合反応により、大量のエネルギーやニュートリノが発生し宇宙空間に向かって放出されます。太陽観測によりどのようなことが分かってきたのでしょうか？

『太陽エネルギーを地上に』。この目標に向かって1950年代に核融合研究は始まりました。以後、この夢の実現のため、次々と現れる困難に研究者たちは挑戦し続けては答えを見出し、長足の進歩を成し遂げてきました。そして、今、地上で核融合反応による「火」を灯す一歩手前にまで来ています。一億度の物質の世界、プラズマをターゲットにした核融合研究は、私どもの研究所が推進している大型ヘリカル装置(LHD)実験のように、学術研究と科学技術との高度なインテグレーションによるものです。

核融合エネルギーの実現を目指す研究は、人類の壮大なチャレンジであり、この21世紀に入って、一億度のプラズマはごく普通に作れるようになり、1時間を超える放電と1000兆個/ccの密度が実現するなど夢から明確な目標となりました。核融合エネルギーが実現すれば、電気はもちろん、無公害型の水素エネルギーを安定に作り出すことができます。私たちの高度文明を環境にも配慮しながら、一万年というタイムスケールで持続させることも可能になるでしょう。核融合エネルギーの実現を目指す研究が今どこまで進んできたのか、このシンポジウムでは核融合研究の過去、現在、未来を余すところ無く紹介いたします。

Keywords

核融合：小さな原子核どうしが一つになって（融合して）大きな原子核に変わる現象のこと。例えば水素原子核どうしが融合してヘリウム原子核となる。そのときに大きなエネルギーが発生する。現在の原子力発電所では、逆に大きな原子核が小さな原子核に分離する核分裂反応を利用しており、核融合とは異なる。

プラズマ：高温の電離気体のこと。プラズマ中では物質を構成する原子核と電子とがばらばらになって飛び交っている。おおむね数千度～1万度になるとどんな物質もプラズマ状態となる。プラズマの身近な例は、稲妻、炎等であるが、宇宙では恒星をはじめ、ほとんどがプラズマ状態である。

LHD (Large Helical Device ; 大型ヘリカル装置)：核融合科学研究所にあるプラズマ実験装置。プラズマの閉じ込めに必要な磁場を、らせん状に巻かれた超伝導コイルで発生させる、我が国独自の方式を用いている。参考URL (<http://www.lhd.nifs.ac.jp/>)

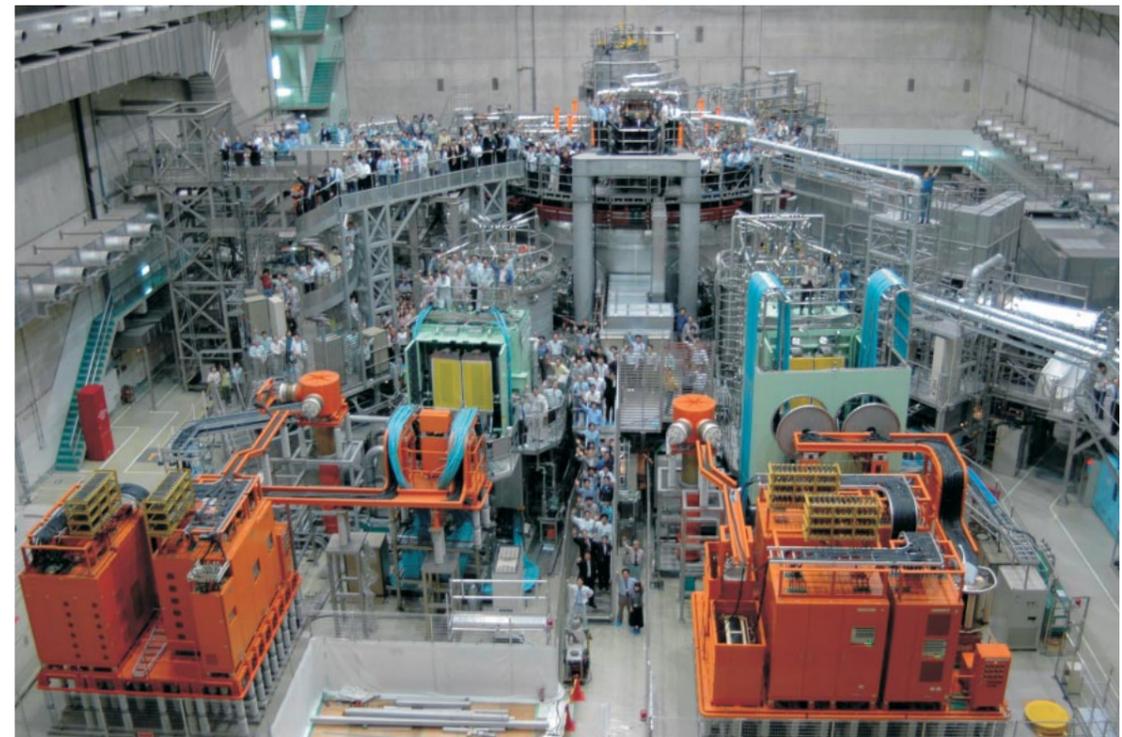


図1 大型ヘリカル装置(LHD)(核融合科学研究所)



自然科学研究機構 理事・副機構長、核融合科学研究所長。

1971年京都大学理学部卒業、76年京都大学大学院工学研究科電気工学第二専攻博士課程修了。80年京都大学ヘリオトロン核融合研究センター助教授、87年同教授、89年核融合科学研究所大型ヘリカル研究部教授、研究主幹、研究総主幹を経て、2004年より現職。90年より98年までLHDの建設責任者を務め、その後、03年まで実験責任者の任に当たる。

専門はプラズマ物理学、核融合炉工学、特に高温プラズマの閉じ込めと制御。

02年 Alfvén Award、06年 文部科学大臣表彰科学技術賞受賞。

第一部 宇宙の核融合

10:40 ~ 11:10

私たちに最も近い星・太陽と、地球とのつながり

国立天文台 桜井 隆

11:10 ~ 11:40

ニュートリノで探る太陽

東京大学宇宙線研究所 鈴木洋一郎

11:40 ~ 12:00

地上の太陽から宇宙を探る

核融合科学研究所 加藤 隆子

私たちに最も近い星・太陽と地球とのつながり

国立天文台 太陽天体プラズマ研究部 さくらい たかし
桜井 隆

恒星は巨大なガスの塊で、その重力で中心部が圧縮され高温高密度になり、核融合反応が起こっている。例えば太陽の中心は1500万度という高温であることがわかっている。そこで発生するエネルギーにより星は輝き、重力でつぶれてしまわずに大きさを保っている。宇宙を構成する物質は水素が大部分なので、普通の星では水素をヘリウムに変換する核融合反応が起こり、またその過程でニュートリノが放出される。これらの性質は20世紀前半に、原子核物理学の発展と恒星内部構造の理論的研究により導かれたが、最近では日震学という研究手段の発達で太陽の内部構造は定量的に非常によくわかっている。

燃料の水素の量は有限であり、また燃えかすのヘリウムが蓄積するので、太陽はやがて膨張して赤色巨星に進化して行く。数十億年たてば地球は灼熱の世界となり生命が住めなくなる。もっと短い時間尺度では、太陽のコロナの中で起こるフレア爆発などが地球で磁気嵐やオーロラを引き起こすなど、地球近傍の宇宙環境は太陽の影響を強く受けている。どのような仕組みでフレア爆発が起こるかは、1991年に打ち上げられた「ようこう」衛星のX線観測で飛躍的に研究が進んだ。太陽表面のエネルギー源とコロナでのエネルギー解放の関係は、2006年9月に打ち上げられた「ひので」衛星の最重要の研究課題である。これら、太陽に起因する地球近傍空間の数時間から数日の変化を宇宙天気と呼ぶ。もう少し長い時間尺度では、太陽黒点の数が約11年の周期で増減する、太陽の周期活動というものがある。これに伴って太陽の明るさが僅かながら変化することもわかっているが、これが地球の気候変動や氷河期の到来などに関係するのかどうかについてはまだ定説がない。

Keywords

太陽の周期活動：ガリレオ・ガリレイが17世紀に発見した太陽黒点は、その後の研究で、約11年の周期でその数が増減することが判った。これは、黒点のもととなる磁場が周期的に生成されるということで、太陽が周期11年の交流発電機となっているということもできる。フレア爆発など磁場のエネルギーが引き起こすすべての現象も11年周期で増減するので、それらを総合して太陽の周期活動と呼んでいる。

宇宙天気：太陽での活動によって引き起こされる、地球近傍の宇宙空間の変動のこと。極地方で見られるオーロラや、磁気嵐、電離層異常による短波通信の障害などは古くから知られていたが、近年では人工衛星の機能障害や、宇宙飛行士の放射線被曝などが注目され、これらの危険を予報する「宇宙天気予報」の研究も盛んである。

恒星の進化：核融合反応による燃料物質の消費と生成物の蓄積により、星の内部構造が変わり、明るさや大きさが変わる。太陽の場合、誕生時から光度はゆっくり増加して行くが、赤色巨星への進化をたどり始めると急速に大きく明るくなり、その後周りの物質を星間空間に放出して、小さく高密度の白色矮星となって一生を終わる。

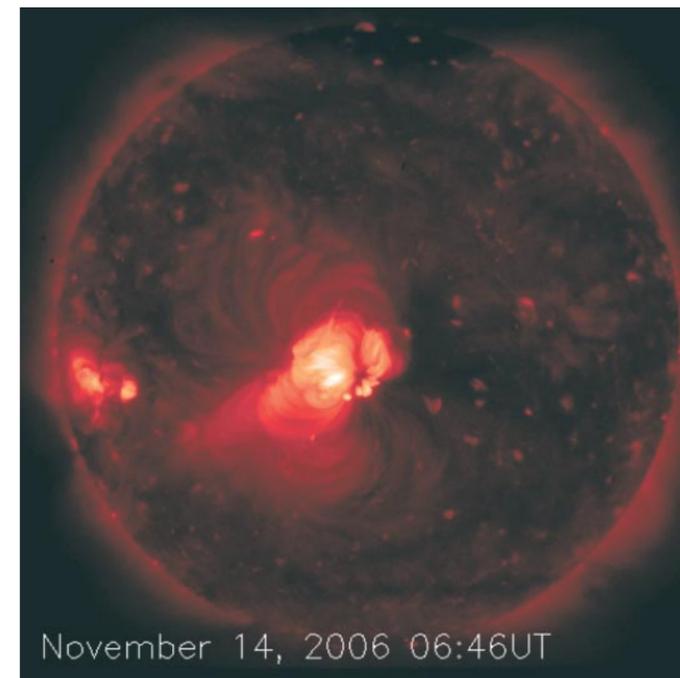


図1 「ひので」衛星のX線望遠鏡が撮影した太陽コロナ

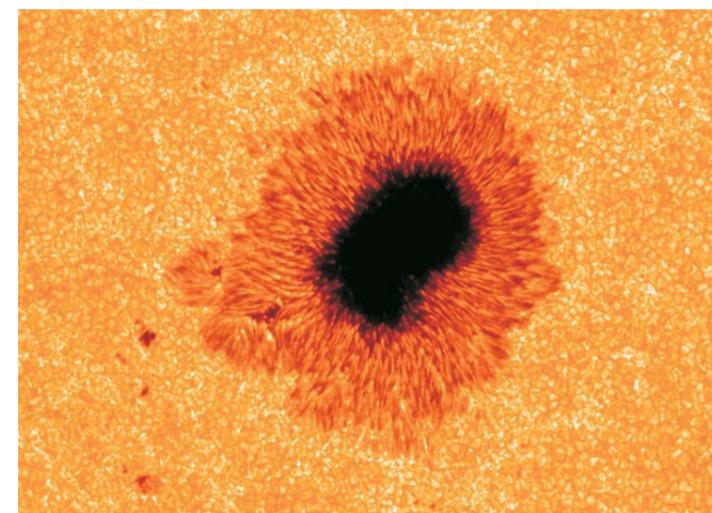


図2 「ひので衛星」の可視光望遠鏡が撮影した太陽黒点



国立天文台 太陽天体プラズマ研究部・教授。理学博士。

1973年東京工業大学理学部物理学科卒業。78年東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士課程修了。同年東京大学理学部助手、86年東京大学東京天文台助手、88年国立天文台助教授、92年同教授を経て、2006年より自然科学研究機構国立天文台教授、副台長。

専門は太陽物理学、特に太陽の磁場と活動現象の観測的・理論的研究。現在は「ひので」衛星の科学主任(2名のうちの一人)を務め「ひので」のデータを使った研究を進める一方、赤外線を用いた太陽磁場の観測装置を三鷹キャンパスに建設中である。

ニュートリノで探る太陽

東京大学 宇宙線研究所 **すずき 洋一郎**

太陽は巨大な核融合炉である。そこでは毎秒 3.9×10^{26} J という巨大なエネルギーが発生し、同時に毎秒 1.9×10^{38} 個のニュートリノが発生している。太陽から来るニュートリノを検出すれば、太陽内部の核融合反応の様子が分かるだろうということで、太陽ニュートリノを観測しようとする試みが1960年代後半からはじまった。最初の実験は、塩素がニュートリノを吸収してアルゴン（ガス）に変わる事を利用した実験である。しかし、この結果が「観測されたニュートリノは期待値の半分以下である」という30年にわたる「消えた太陽ニュートリノの謎」の始まりであった。塩素実験の謎は、1987年から観測を始めたカミオカンデIIで確認された。謎は大きな注目を集めることになる。それから15年後、「太陽ニュートリノの謎」は、ニュートリノに質量があるという大発見とともに解決するのである。この解決に大きな力を発揮したのが、スーパーカミオカンデとカナダのSNO実験であった。ニュートリノに質量があると、ニュートリノ振動と呼ばれる現象がおき、ニュートリノが測定器では検出できない種類に変わっていたのだ。ニュートリノ振動の様子が分かった今、太陽ニュートリノの観測は当初の目標、ニュートリノによる太陽内部の観測に戻ったのだ。この太陽ニュートリノ観測と1987年の超新星からのニュートリノ検出によりニュートリノ天文学が始まったとされる。



東京大学宇宙線研究所・所長。理学博士（京都大学）

1979年京都大学大学院理学研究科物理学専攻博士課程単位修得後退学。同年日本学術振興会奨励研究員、ブラウン大学 Research Associate（物理学科）、81年ブラウン大学 Research Assistant Professor（物理学科）、同年大阪大学助手（理学部）、89年東京大学助教授（宇宙線研究所）、96年同大学教授（宇宙線研究所・神岡宇宙素粒子研究施設）、2002年神岡宇宙素粒子研究施設長、03年東京大学総長補佐を経て、04年より現職。02年よりスーパーカミオカンデ実験代表者。

98年度朝日賞（グループ受賞）：ニュートリノに質量があることの発見、01年第47回仁科記念賞：太陽ニュートリノの精密観測によるニュートリノ振動の発見。

地上の太陽から宇宙を探る

自然科学研究機構 核融合科学研究所 **かとう たかこ**
加藤 隆子

宇宙を科学的に知ることは星からの光を見ることから始まりました。ガリレオ・ガリレイやニュートン達が星の運動を望遠鏡で観測することにより、地球の動き、天体の動きの法則を見いだした事はご存じのとおりです。当時は私たちが日常目に感じる可視光の波長域で見えていました。しかし光は可視光だけでなく電波からガンマ線まで広い領域に渡っています。宇宙の初期のなごりである3度Kの黒体輻射からブラックホール近傍のX線まで、宇宙は広い波長域に渡って光を放出しています。プリズムに光を当てると虹色に見えるのは光の波長がプリズムで分けられるためです。このように光を波長で分ける事を分光といいます。スペクトル線が見えるのは原子のエネルギー準位が連続でなく離散的であるからです。量子力学の発達は分光から始まりました。分光学により宇宙にある様々な元素の存在が解るようになりました。

プラズマは固体のように静止しているのではなく、粒子が高速で原子衝突をしながら光を出しています。プラズマを分光する事によりプラズマの動きを調べることができます。波長によって見える物理は異なっています。太陽も星もプラズマです。星は遠くて手が届きません。またプラズマは熱くて温度計を入れる事はできません。宇宙を探るためにはプラズマ分光は不可欠な方法です。プラズマの動きを取り入れた非平衡モデルにより星の組成を調べると宇宙の進化についての新しい知見が期待できます。分光により分子やラディカルを観測することは生命の起源につながります。プラズマの動き(ダイナミクス)を取り入れた新しい分光は宇宙天気予報などの太陽のダイナミクス関連の研究に寄与します。地上の太陽をめざす核融合実験装置では温度や密度(プラズマパラメーター)を測定する事ができます。宇宙では地上で使う測定装置が使えないために、プラズマパラメーターが測定できません。プラズマパラメーターの良く解っている地上の実験装置LHDを用いて非平衡プラズマを研究し、未知の領域を切り開こうとしています。これらの知識をもとに、太陽や宇宙の謎を解くことができます。

Keywords
プラズマ分光：プラズマからの光を分光器により波長毎に分けて測定する。原子特有のスペクトル線が現れる。
原子衝突：プラズマ中ではイオンと電子が高速で飛び交っている。それらはお互いに衝突をし、イオンの状態を励起したり、電離したりする。衝突の際に励起されたイオンは光を放出して安定化する。
イオン：プラズマ中では原子に電子が衝突し原子に束縛されている電子が飛び出しイオンとなる。鉄のような電子の多い原子では飛び出した電子の数により異なった多くの種類のイオンができる。

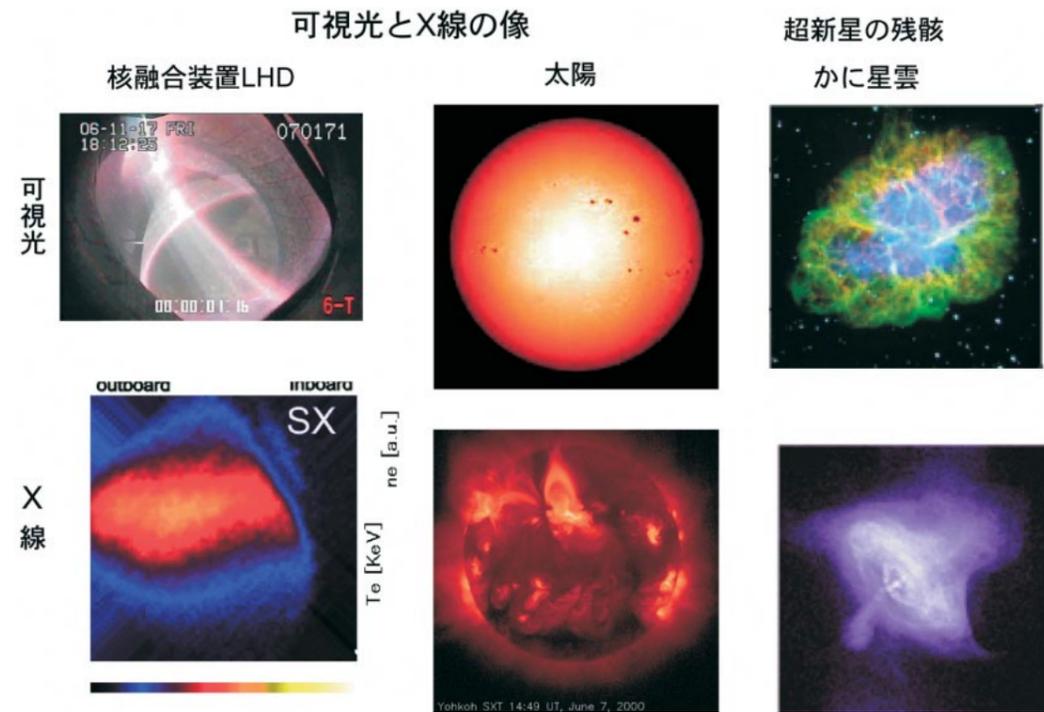


図1 核融合装置LHD、太陽および超新星の残骸(かに星雲)を可視光の波長で見た場合(上)とX線で見た場合(下)。波長によって見える像が異なることが解る

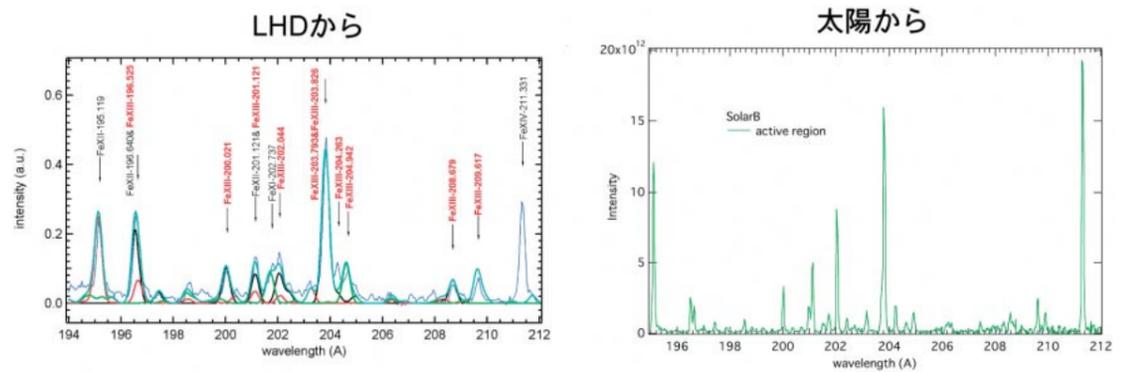


図2 194-212Å領域の鉄イオンからのスペクトル。左はLHDで測定したスペクトル、右は太陽観測人工衛星ひのでにより測定された同じ波長域のスペクトル。強い線のでている波長は同じであるが強度比が異なることが解る



自然科学研究機構 核融合科学研究所・教授。理学博士。

1966年名古屋大学理学部物理学科卒業。72年名古屋大学理学研究科博士課程修了。78年名古屋大学プラズマ研究所助手、90年同助教授、98年より現職。

専門はプラズマ原子過程。原子分子データベース、プラズマ分光によるプラズマ診断、プラズマと原子物理との境界領域の開拓に興味をもつ。

92年猿橋賞受賞。

第二部 地上の核融合

13:10 ~ 13:20

導入

立花 隆

13:20 ~ 14:00

一億度のプラズマを閉じ込める

核融合科学研究所 山田 弘司

14:00 ~ 14:20

一億度にプラズマを加熱する

核融合科学研究所 竹入 康彦

14:20 ~ 14:40

核融合、そして、地球のための超伝導技術

核融合科学研究所 柳 長門

14:50 ~ 15:20

レーザー核融合から新しい宇宙物理学の誕生へ

大阪大学 高部 英明

15:20 ~ 15:50

核融合から 21 世紀の産業技術へ

核融合科学研究所 佐藤 元泰

15:50 ~ 15:55

まとめ

立花 隆

一億度のプラズマを閉じ込める

自然科学研究機構 核融合科学研究所 大型ヘリカル研究部

やまだ ひろし
山田 弘司

核融合エネルギーの実現には一億度という超高温状態にある電離した気体、「プラズマ」の制御が必要不可欠です。高い温度にあるプラズマは不安定になりやすく、同じ状態を定常的に保持することには困難が伴います。これを磁場によって安定に制御し、エネルギーの損失を抑える技術の確立には、極めて複雑な集団現象を起こすプラズマの物理の深い理解とそれを具現化する精緻な工学が必要です。

我々の身近にある炎は二千度程度までであって、金属や陶器などによって閉じ込めることができます。しかし、核融合プラズマがこのような材料に直接接することは許されません。幸い、プラズマは電荷を持ったイオンと電子でできていますので、磁場を使って閉じ込めることができます。磁場中にある荷電粒子には、その運動方向に垂直な電磁力が働くことを利用します。この磁力線を電磁石で作成し、ドーナツ状にすることによって磁場の容器ができます(図1)。磁場の容器は図2にあるように「磁気面」と呼ばれる層構造を持っています。基本はこうなのですが、プラズマは単独の荷電粒子としての運動に加えて集団現象を起こし、「異常輸送」を発生させます。通常の流体でも渦などの集団現象が生まれることが知られていますが、電磁場を伴うプラズマの振る舞いは極めて複雑になります。特に、この傾向はプラズマの圧力(ベータ値)が上昇すると顕著になります。

講演では、一億度を閉じ込めるための実験装置が巨大なだけでなく、物理設計からも工学製作からも精緻なものであること、プラズマの振る舞いでは異常輸送解明への努力や、微視的な乱れがあるからこそ巨視的な構造、すなわち秩序が保たれること、そして、これらの研究に大型ヘリカル装置(LHD)での実験から如何に画期的な発見があったか、をご紹介します。

Keywords

磁気面：プラズマの磁場閉じ込めでは磁力線を環状に回らすだけでなく、磁力線を追跡すると閉じた曲面を作るようにします。この閉曲面によって真ん中から外側へと入れ子状に籠を重ねたような構造になります。マトリョーシカというロシアの人形をご存知でしょうか？このドーナツ型のマトリョーシカ、閉曲面を磁気面と呼びます。

異常輸送：プラズマを作るイオンと電子、その荷電粒子一つ一つの磁場中の振る舞いと粒子間の衝突は比較的簡単に記述することができます。これによって熱や粒子が運ばれる拡散という現象が生じます。この物理描像は古典的と呼ばれます。しかしながら、実際のプラズマ中ではその複雑な集団現象によってこの古典的描像では説明できない拡散や運動が存在し、熱や粒子がより速く輸送されます。この輸送の性質についての一定の予測は可能になってきましたが、発生機構を統一的に説明する理論は未だ確立されておらず、未決という意味を含めて、異常輸送と呼ばれています。

ベータ値：核融合炉に必要なプラズマは高い圧力(温度と密度の積)を持っています。これを磁場の圧力で閉じ込める訳ですが、その圧力比(プラズマの圧力/磁場の圧力)をベータ値といいます。ベータ値が高いことは高い圧力を持つプラズマを低い磁場で閉じ込めることができることを意味し、経済性を考えた場合、5%程度となることが核融合炉では目安となります。ベータ値を高くすると不安定性が起こりやすくなりますので、それを克服することが課題です。LHDはこの50年間の理論的なくびきを解き放つ実験結果を示しました。

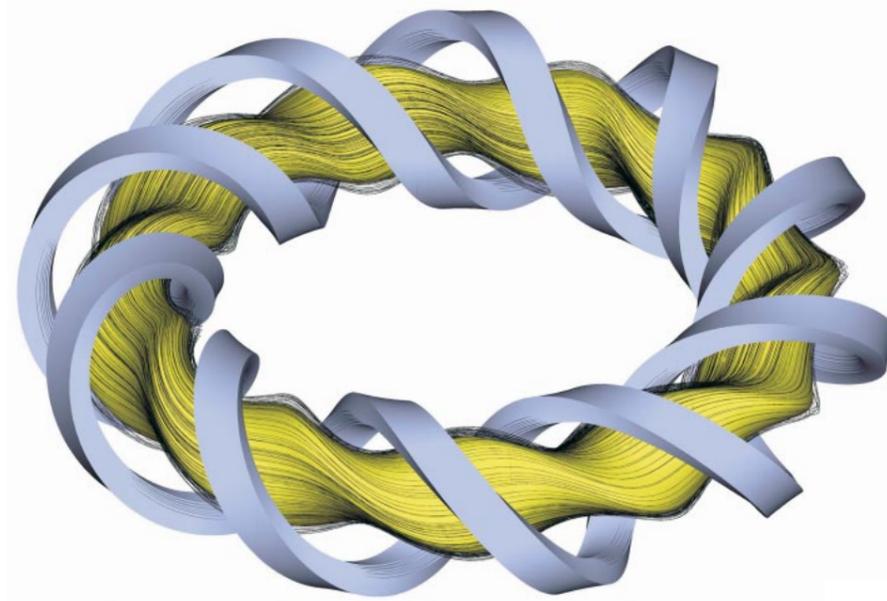


図1 大型ヘリカル装置(LHD)のヘリカル電磁石(青)、それによって生成される磁力線(黒細線)、さらに磁場に閉じ込められたプラズマ(黄色)

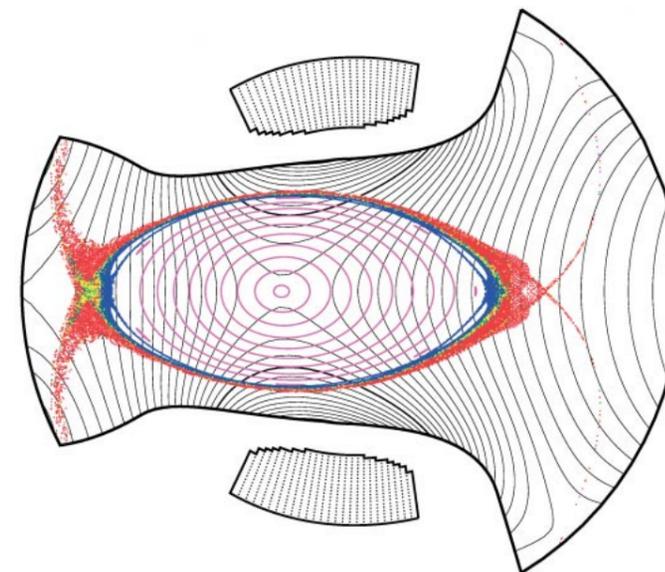


図2 大型ヘリカル装置の断面図。上下に1対のヘリカル電磁石の断面がある。紫色の同心の楕円状の構造が磁気面



自然科学研究機構 核融合科学研究所 大型ヘリカル研究部・教授・研究主幹 / 総合研究大学院大学 物理科学研究科・教授。工学博士。

1982年東京大学工学部原子力工学科卒業。87年東京大学大学院博士課程修了。

95年核融合科学研究所大型ヘリカル研究部助教授を経て、2004年より現職。

専門は核融合科学。特にプラズマ物理学。現在は高温プラズマを磁場で閉じ込める実験に専心。

96年プラズマ・核融合学会論文賞受賞。

文部科学省・学術調査官、同・独立行政法人評価委員会臨時委員を歴任。

一億度にプラズマを加熱する

自然科学研究機構 核融合科学研究所 **たけいり やすひこ**
竹入 康彦

地上の核融合を実現するためには、磁場に閉じ込められたプラズマを一億度以上に加熱する必要がある。プラズマの加熱には、高速の中性粒子ビームをプラズマに入射する方法（中性粒子入射加熱法）が主に用いられているが、プラズマへ投入する加熱電力としては数万 kW 以上も必要なため、それを可能とする大電力の加熱機器を開発しなければならない。ここでは、大型ヘリカル装置のプラズマを一億度以上に加熱するために開発した中性粒子入射加熱装置について、その要となる負イオン源を中心に紹介する。

高速の粒子ビームを用いて高温のプラズマを加熱するためには、入射する粒子のスピードを秒速数千 km 以上にする必要があり、荷電粒子であるイオンを電気的に加速するイオン源が用いられている。従来のイオン源では生成の容易な正イオンが用いられていたが、大型ヘリカル装置では必要とする粒子スピードが秒速 6,000 km と大きく、粒子を加速するのに必要な電圧が従来の 2 倍以上の 180 kV と極めて高いことから、高速度でも比較的容易に中性粒子へ変換することのできる負イオン（マイナスイオン）を利用した大電力の負イオン源の開発が必要となった。負イオンは正イオンに比べて非常に生成しにくいいため、開発は様々な困難に直面したが、それを乗り越えて 180 kV-30 A という世界最高性能の負イオン源の開発に成功した。その結果、10,000 kW を超える粒子ビーム加熱により、1.5 億度のイオン温度を達成することができた。将来の核融合炉では、1,000 kV 以上で粒子を加速する必要があり、今後のさらなる開発が求められている。

Keywords **中性粒子入射加熱法**：高速の中性粒子を磁場に閉じ込められたプラズマへ入射して、その運動エネルギーをプラズマ粒子との摩擦熱により渡して、プラズマの温度を上昇させる加熱法。機関銃から連続的に弾丸を標的に打ち込み、標的の温度を上昇させるのに例えることができる。高速粒子ビームはイオン源（イオン銃）により生成されるが、電気を帯びたイオンのままでは磁場にはね返されてプラズマに入射できないため、加速したイオンビームを中性粒子ビームに変換する。通常イオン源には生成の容易な正イオンが使われるが、水素イオンを加速する電圧が 80 kV を超えると中性粒子への変換効率が急激に低下するため、このような高速粒子に対しては、中性粒子への変換効率の高い負イオンを用いる必要がある。

負イオン源：水素原子は正の電荷を持つ原子核と負の電荷を持つ電子 1 個よりなっており、全体として電気的に中性であるが、それに電子をさらに 1 個くっつけると全体として負に帯電した負イオン（マイナスイオン）となる。この負イオンをビームとして取り出すのが負イオン源である。原子から電子を 1 個取り去ると正に帯電した正イオンとなるが、電子を取る方が容易なため、通常の放電プラズマは正イオンと電子からなっている。負イオンは生成が難しく、またくっつけた電子は容易に取れるため、大量の負イオンビームを生成するのは簡単ではない。反面、高速度でも負イオンビームから電子を取るの容易なため、中性粒子ビームに変換しやすい。

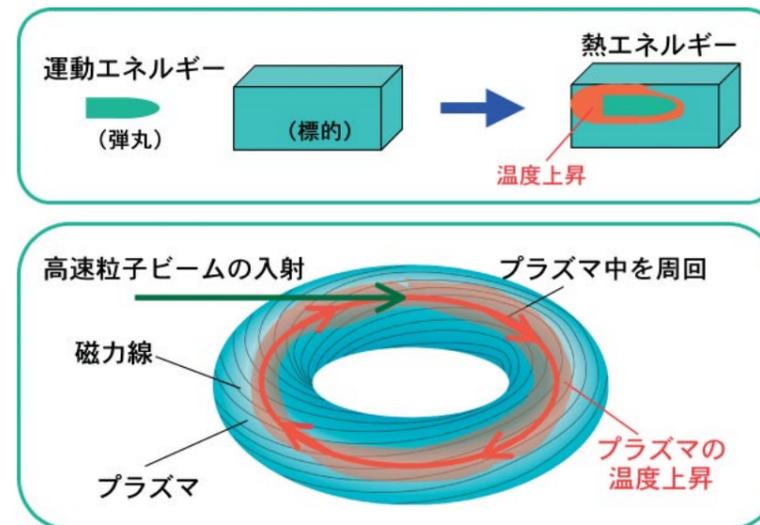


図1 粒子ビームによるプラズマ加熱の模式図。プラズマは希薄なので、入射高速粒子（弾丸）はすぐには止まらずに、プラズマ（標的）中を周回して、そのエネルギーをプラズマに渡す。その結果、プラズマの温度が上昇する

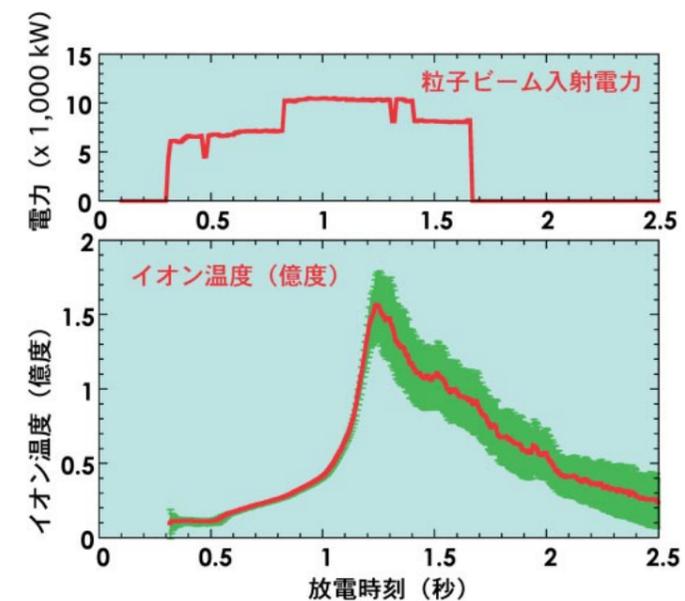


図2 10,000 kW を超える電力の粒子ビーム入射加熱により、イオン温度が 1.5 億度に上昇した。高速粒子ビームの生成には、開発した負イオン源が用いられている



自然科学研究機構 核融合科学研究所・教授。京都大学工学博士。

1981 年京都大学工学部電子工学科卒業。83 年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。85 年同博士課程中退。同年京都大学ヘリオトロン核融合研究センター助手、88 年名古屋大学核融合研究所（仮称）創設準備室助手、89 年核融合科学研究所助手、95 年同助教授を経て、2004 年より現職。

専門は核融合プラズマ加熱、プラズマ閉じ込めおよび核融合装置工学。現在の最大の関心事はプラズマの性能をさらに上げることにあるが、広く粒子ビームの応用にも関心をもっている。

核融合、そして、地球のための超伝導技術

自然科学研究機構 核融合科学研究所 **柳 長門** やなぎ ながと

高温のプラズマを磁力線のカゴによって閉じ込める核融合装置では、大電流をコイルに流すことで強力な磁場を発生させます。これには、超伝導コイルが必要不可欠となっています。核融合科学研究所の大型ヘリカル装置「LHD」は、現在の核融合実験装置の中で世界最大の超伝導コイルシステムを有し、直径8メートルという大きなドーナツの周りに2本の超伝導ヘリカルコイルが、らせん状（ヘリカル）に巻かれています。これによって、地磁気の10万倍という強力な磁場を定常的に発生することができます。核融合科学研究所では、今後、LHDをさらに大きくした核融合発電実証炉「FFHR」を建設すべく、現在、工学設計を精力的に進めています。

一方、核融合炉で発電した電力をロス少なく有効に利用するには、近年、開発が進んでいる高温超伝導ケーブルを用いることが有望です。比較的近い未来には地球規模の送電ネットワークを構築して、核融合や自然エネルギーで発電した電力を世界中で融通しあうことも実現可能になると期待できます。さらに超伝導技術を発展させると、少し遠い未来には、地球規模の超伝導コイルを作ることも考えられるかも知れません。地球は大きな磁石として地磁気を発生し、宇宙から飛来する高エネルギー粒子（放射線）の侵入を防いでいますが、いつか地磁気が消える日が来るとしたら。それは、特に高度文明にとっては大変な事態です。そこで、もし直径が数千キロメートルの超巨大超伝導コイルを作ることができれば、人工地磁気によって文明をプロテクトできるかも知れません...。あまりに壮大な話ですが、いったいどれぐらいの超伝導コイルが必要なのか、想像たくましく設計計算をしてみましょう。すると、意外にもまったくの夢物語とも言えないことがわかってきました。超伝導工学研究の現状と夢の一端をご紹介します。

Keywords **超伝導**：ある種の金属などを液体ヘリウム（マイナス269度）などを用いて低温に保つと、電気抵抗がゼロとなり、発熱を伴わずに電流を流すことができます。これを「超伝導」と呼び、1911年に発見されました。核融合装置などの大型の超伝導コイルには、ニオブチタンやニオブ3スズと呼ばれる金属系超伝導材料で作った線材が用いられます。

高温超伝導：1986年に特殊な酸化銅系材料（セラミック）が超伝導特性を示すことが発見され、超伝導に転移する温度が従来の金属系材料と比べて格段に高くなることがわかりました。以来、これら高温超伝導材料を実用化するための技術開発が精力的に行われています。現在は、線材の製品化が始まり、超伝導電力ケーブルや超伝導モータなどの開発も始まっています。ただし、「高温」といっても液体窒素温度（マイナス196度）程度で使うのが限界なので、実際にはかなりの「低温」です。

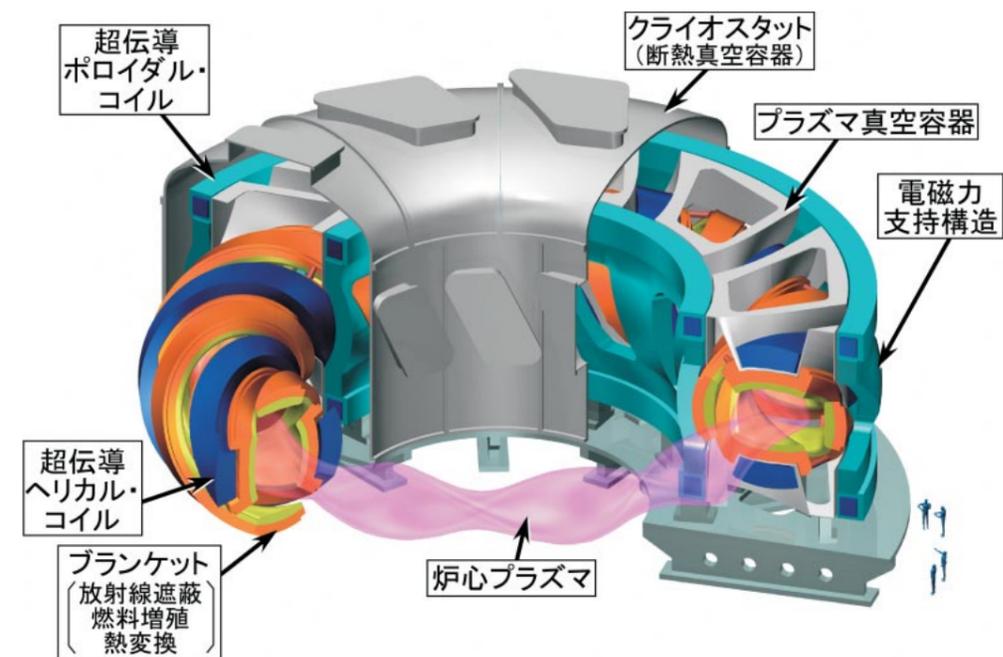


図1 ヘリカル型核融合発電実証炉「FFHR」の想像図。プラズマの直径は約30m。外径は大きいですが、サッカーコートの半分には入る。ドーナツがスレンダーなので、同じ核融合パワーを生み出すトカマク型核融合炉（太くて小さいドーナツ）と比べて、重量やコストは同程度。定常的に運転しやすく、メンテナンスフリーに近い炉にできると期待。LHDの製作によって大きな進歩を遂げた超伝導技術をさらに進化させ、大きさ4倍、エネルギー100倍の超伝導コイルシステムを設計中。



図2 大型ヘリカル装置（LHD）の直流電源と超伝導コイル群を結ぶ「超伝導バスライン」。外径22cm、総延長約500m。電流容量は、プラス側とマイナス側の導体を合わせると6万アンペア。本格的な超伝導送電ケーブルとして世界に先駆けて開発された。先進的な高温超伝導導体を用いることで電流容量を250倍に、ただし外径は3倍程度に抑えられる、長さを8万倍すれば、人工地磁気を発生する「超伝導グローバル・プロテクター」が建設できるかも？



核融合科学研究所 大型ヘリカル研究部 炉システム・応用技術研究系・助教授。博士（工学）

1987年京都大学大学院工学研究科修士課程終了。89年核融合科学研究所大型ヘリカル研究部装置技術研究系助手、2000年より現職。

専門は超伝導工学。現在は、核融合に用いるための大電流容量高温超伝導導体およびコイルの開発とヘリオトロン磁場構造の新たな展開に関心をもつ。

レーザー核融合から 新しい宇宙物理学の誕生へ

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター **たかへ 高部** **ひであき 英明**

磁場閉じ込め核融合が高温のプラズマを磁場に巻き付けて長時間（数秒間）閉じ込め、その間に起こる核融合反応でエネルギーを取り出すのに対し、大規模なレーザー装置で核融合反応プラズマを生成し、瞬時（1億分の1秒）に核融合を起こし、それを1秒間に10回程度、連続的に繰り返すことでエネルギーを取り出すというのがレーザー核融合である。レーザー核融合では直径5mm程度の燃料球に100本近いレーザーを集光し表面に均等に照射し、表面に生成したプラズマのロケット噴射の反作用で燃料球を爆発的に収縮させ、圧縮・加熱し、核反応を起こす。核融合反応で輝くミニチュアの星を人工的に作ることになる。超新星1987Aの爆発が観測されてから20年が経った。この爆発を契機に「逆転の発想」である、レーザーで宇宙の様々な極限状態を実験室で模擬し、今まで地上で検証することができなかった宇宙物理の数値モデルを確認・検証し、宇宙物理学を精密科学にしていこうというのが表題の趣旨である。そのような学術分野を私たちは「実験室宇宙物理学」と呼んでいる。実験室宇宙物理学は宇宙の神秘の新たな発見も実験室で行おうというものであり、その魅力について講演したい。また、本分野の世界の動き、このような研究が長期のエネルギー開発を目指す核融合研究に不可欠である理由について私の考える科学政策のあり方を示しつつ講演したい。

Keywords

超新星1987A：87年2月23日に爆発が観測された超新星。太陽質量の20倍もある巨大な星が核融合反応を終え、最後の星の中心にできた太陽質量ほどの鉄のコアが吸熱反応でアルファ粒子に分解し、重力崩壊し中心に原始中性子星ができる。原始中性子星で生成されたニュートリノにより星が爆発する。このような物理過程を経た華々しい大質量性の最後の姿が超新星爆発である。このニュートリノを神岡の純水タンクで観測した小柴先生は2002年のノーベル物理学賞に輝いた。爆発の流体不安定はレーザー核融合の爆縮の不安定とスケールが12桁ほど違うが同じ数式に従い物理は同じである。

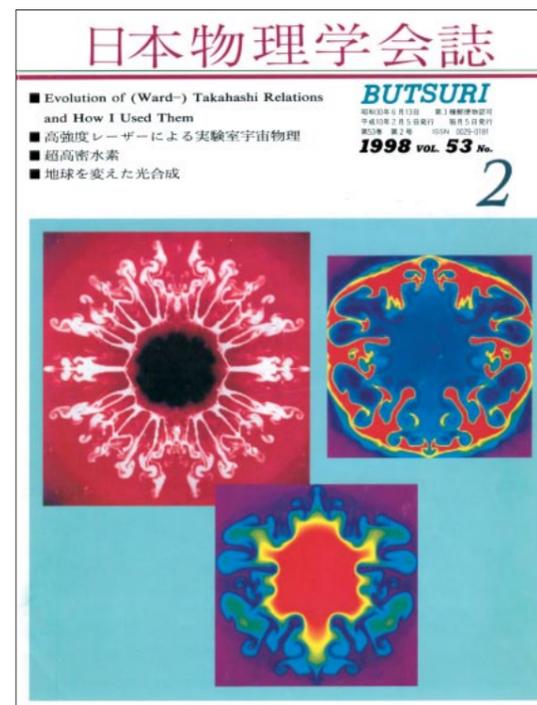


図1 レーザー核融合の爆縮と超新星爆発の物理の相似性が物理学会誌の表紙を飾った。表紙、左上が超新星1987Aの爆発の流体シミュレーション、右上と下がレーザー核融合爆縮の密度と温度の分布。この物理の共通性が「実験室宇宙物理学」を生むきっかけとなった

図2 大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの大型レーザー装置激光XII号。鉛筆の芯ほどのレーザーは図中グリーンの部分に設置された増幅器などを通過し、最終的に1本が直径30cmのレーザービーム12本となり、それがレンズで集光され、1mm程度のターゲット表面に同時に照射される。その結果、ターゲットはプラズマとなり太陽中心に匹敵する高温・高密度プラズマが瞬時に生まれる



大阪大学レーザーエネルギー学研究センター・教授。大阪大学理学研究科物理学専攻および宇宙地球科学専攻協力講座・教授。工学博士。

1975年大阪大学工学部電気工学科卒業。80年大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻修了。西独マックス・プランク・プラズマ物理研究所研究員、米国アリゾナ大学助手、大阪大学レーザー核融合研究センター助手、89年講師、91年助教授、97年より現職。専門はプラズマ物理学、計算科学、宇宙物理学。現在は実験室と宇宙のプラズマ物理学を統合することに興味をもつ。

2000年フェローの称号（米国物理学会）、03年エドワード・テラー・メダル受賞（米国原子力学会）、06年名誉教授の称号（中国国家天文台）

著書に『さまざまなプラズマ』（岩波書店/2004）などがある。

現在、アジア太平洋物理学会連合理事（<http://www.aapps.org/>）

核融合から21世紀の産業技術へ

自然科学研究機構 核融合科学研究所 連携研究推進センター / 大型ヘリカル研究部 炉システム・応用技術研究系 **さとう もとやす 佐藤 元泰**

人類は1万年間、炎（ほのお）を使って物質を外側から熱するという手段で文明を築いてきました。核融合の実現はこのエネルギー系に大きな変革をもたらす壮大なロマンであります。この過程における研究においても、多くの波及的研究開発を生んでいます。

我々は、核融合で培った大電力マイクロ波技術を基礎として、マイクロ波の電界と磁界が物質を構成する原子分子の内部にある電子に直接働きかけることを見いだしました。この原理を使って、水やセラミックなど非導電性の物質だけではなく、金属であっても粉末、つまり不連続体ならば、マイクロ波で効率よく加熱できることを明らかにしました。外部からの熱に依らない物質の創成と新しい加工技術の誕生です（図1）。

応用の一例を挙げます。共同研究によって、東工大と核融合科学研究所は鉄鉱石と石炭の混合粉末にマイクロ波を照射して銑鉄を作ることに成功しました¹⁾。昇温と還元のエネルギーをマイクロ波の電磁界エネルギーで供給しますので、供給炭素量を1/2、全産業比でも炭酸ガス排出量を4%削減できます。その銑鉄中の不純物濃度は、通常の高炉からの銑鉄の1/10という高品質でした（図2）。

このように、炎という古典的手段に対し、物質の電子構造に直接働きかけるというマイクロ波は、次の1万年の人類文明の基盤技術となる可能性を秘めており、各国研究者や産業界の注目を集めています。核融合科学研究所は、この他にも核融合研究によって革新的に進んだ超伝導や計測技術などを使って、多くの新しい産業の育成・発展に貢献しています。

参考文献

1) M. Sato, A. Matsubara, S. Takayama, S. Sudo, O. Motojima, Kazuhiro Nagata; *Proc. TMS Sohn International Conference*, San Diego, (2006)

Keywords **マイクロ波**：「マイクロ波」とは、電波の周波数による分類の一つであり、一般的には1ギガヘルツから1000ギガヘルツの電波のことである。応用分野は、衛星放送、通信、レーダー、マイクロ波プラズマ、マイクロ波加熱（中で最もポピュラーなものが電子レンジ）など幅広い。

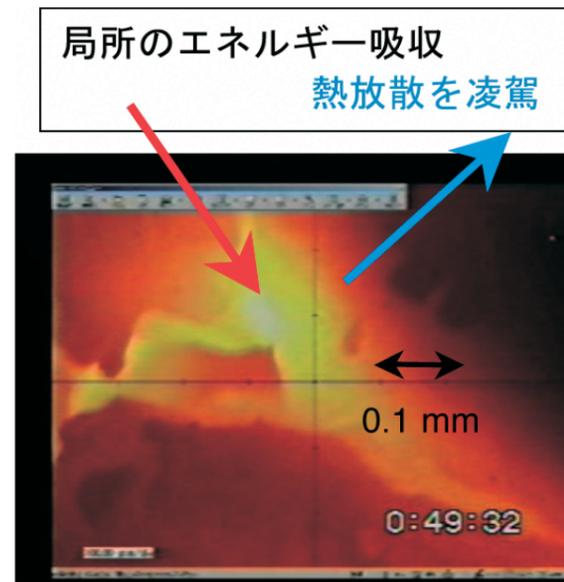


図1 マイクロ波加熱中の酸化鉄の世界最初の顕微鏡画像 加熱されるスポットは周囲より高温、このスポットは移動してゆく

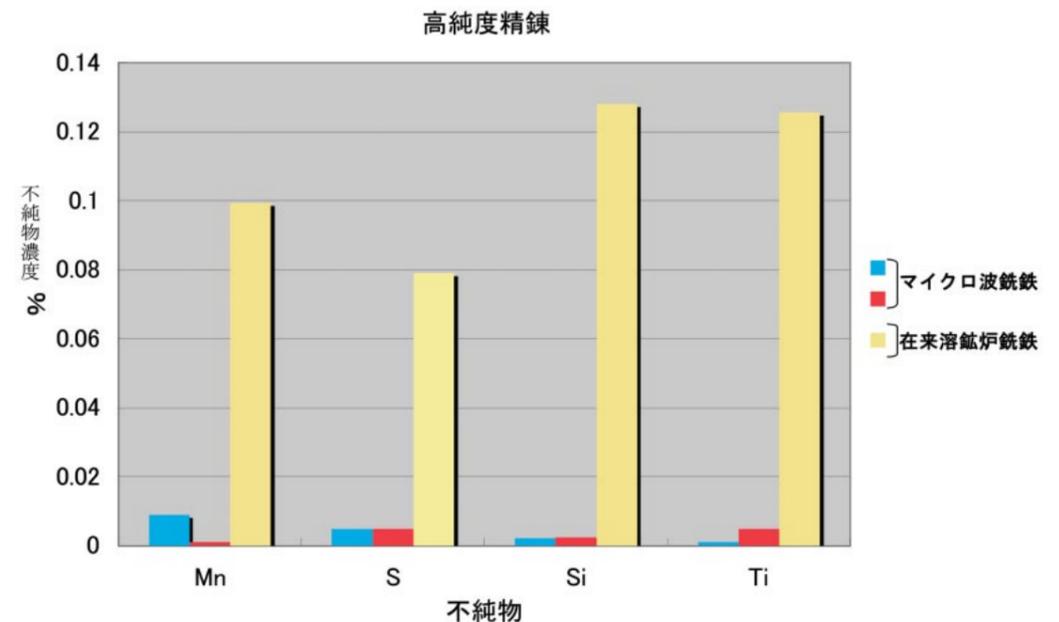


図2 マイクロ波で製銑した銑鉄中の不純物濃度の在来溶鉱炉との比較



自然科学研究機構 核融合科学研究所 連携研究推進センター長 / 大型ヘリカル研究部 炉システム・応用技術研究系・教授。

1976年京都大学大学院工学研究課博士課程修了、工博。同年京都大学ヘリオトロン核融合研究センター助手、助教授、90年文部科学省核融合科学研究所助教授、97年同教授。一貫して電磁波・マイクロ波によるプラズマ加熱の研究に従事、大電力発振機の開発とその応用を推進。

科学研究費特定領域「マイクロ波励起・高温非平衡反応場の科学」領域代表、日本電磁波応用学会副理事長。

16:05 ~ 17:10

パネルディスカッション 一万年続く高度文明は 存在するか？

司 会：NHK アナウンサー 葛西 聖司

パネリスト：
立花 隆
漫画家 松本 零士
前国立天文台長 海部 宣男
本島 修



まつもと れいじ
松本 零士

1938年福岡県久留米市生まれ。53年「蜜蜂の冒険」で漫画界デビュー。同作品で「漫画少年」第一回新人王、72年「男おいどん」で講談社出版文化賞漫画部門賞を受賞。「宇宙戦艦ヤマト」「銀河鉄道999」はアニメ化される。78年「銀河鉄道999」で小学館、日本漫画協会の賞、79年第24回映画の日特別功労賞、2001年紫綬褒章受賞。近年ではフランスのロックバンド、ダフトパンクのプロモーションビデオ制作が話題を呼んだ。ほかに「諸外国との映画、アニメの制作プロジェクト」などの作業が始動しつつある。日本漫画家協会常任理事、著作権部長、財団法人日本宇宙少年団理事長、コンピューターソフトウェア著作権協会理事、社団法人中央青少年団体連絡協議会会長、大阪府立大型児童館ビッグバン館長、かがみがはら航空宇宙博物館名誉館長、焼津ディスカバリーパーク科学館名誉館長、郡山市ふれあい科学館名誉館長、呉歴史海事博物館名誉館長、宝塚造形芸術大学教授、京都産業大学客員教授を兼任。

そのほかの代表作に「戦場まんがシリーズ」「宇宙海賊キャプテンハーロック」「クイーンエメラルダス」「1000年女王」「セクサロイド」「トラジマのミ・め」「銀河鉄道物語」などがある。

現在の連載漫画は、「新宇宙戦艦ヤマト」「銀河鉄道999」「ニーベルングの指輪『神々の黄昏』『燦・天河無限』(いずれもインターネット連載)

また、アニメ作品に「メテルレジェンド」(OVA)、「ハーロックサーガ」(OVA)、「コスモウォーリア零」「ガンフロンティア」「ダフトパンク・プロモーションビデオ」「潜水艦スーパー99」(2003年4月よりAT-Xにて放映)、「キャプテンハーロック」(新作OVA、全13巻、現在毎月一巻発売中)、「銀河鉄道物語」(10月BSフジにて放映)、「大銀河シリーズ」(プロジェクト進行中)があり、諸外国との実写もしくはアニメの共同プロジェクトも起動している。



かさい せいじ
葛西 聖司

NHK エグゼクティブアナウンサー。

1951年東京生まれ。74年中央大学法学部卒。

文化、教養、芸能、教育分野のテレビ、ラジオの番組を数多く担当。ドラマの語り、インタビュー、司会、朗読など。

専門は日本の伝統文化、古典芸能。

著書に『ことばの切っ先』(小学館)、『文楽のツボ』(NHK出版)、『名セリフの力』(展望社)、共著に『能楽史事件簿』(岩波書店)、『能狂言なんでも質問箱』(檜書店)ほか。日本体育大学と山梨英和大学で日本文化論の非常勤講師。



かいふ のりお
海部 宣男

国立天文台名誉教授。理学博士。日本学術会議会員(第三部部长)。

1966年東京大学基礎科学科卒、同大学院天文学専門課程・同大助教授・国立天文台教授、2000年から国立天文台台長を勤め、現在に至る。

専門は電波天文学、赤外線天文学。野辺山の45mミリ波望遠鏡、ハワイの8.2mすばる望遠鏡を建設。星間物質、星と惑星の形成を研究し、ミリ波天文学の開拓などで1987年度仁科記念賞、1998年度日本学士院賞を受賞。『宇宙マンガシリーズ』、『宇宙の謎はどこまで解けたか』、『宇宙をうたう』など一般向け著書多数。

宇宙と人間の関わりを追及し、講演など科学の普及にも力を注ぐ。