核融合発電

ー人工の太陽を地球上に造るー

このスライドはかつて東京理科大学理工学部においてプラズマ工学の授業の一部として話していたものに最近のデータを追加して作成しています（2025/12/15）

東京理科大学名誉教授・小越澄雄

本スライドの内容

１．核融合発電の基礎
　（ほとんどこの話です）
２．核融合炉の候補
３．磁気閉じ込めとトカマク
４．トカマク炉
５．核融合炉開発の現状と将来予測

核融合発電の利点は？

　核融合発電は発電時にCO_2を出さないことに加え、以下の利点を有します。

１．暴走しない
２．資源（燃料）がほぼ無限にあり、かつ偏在していない
３．燃料に含まれる、あるいは発電時に生成される放射性物質は取り扱いが比較的容易

核融合発電の基礎

核融合発電で用いる核融合反応てどういう反応？

核融合発電で用いる核融合反応は、反応を起こすことが比較的容易な（反応断面積が大きい）重水素（D)と三重水素（T)の原子核の融合反応（DT反応）です。

D+T→He（ヘリウム）+n（中性子）

反応前後の質量欠損分が発生エネルギー（Heとnの運動エネルギー）となります。

何故暴走しないと言えるの？

2つの理由があります。

①核融合反応は高温・高圧状態を維持しなければすぐに止まる（つまり電源喪失すれば核融合反応が止まる）。
②炉内には核融合反応を起こす原料がわずかしか存在せず、全部が反応しても巨大なエネルギーを発生しない。

核融合発電の基礎

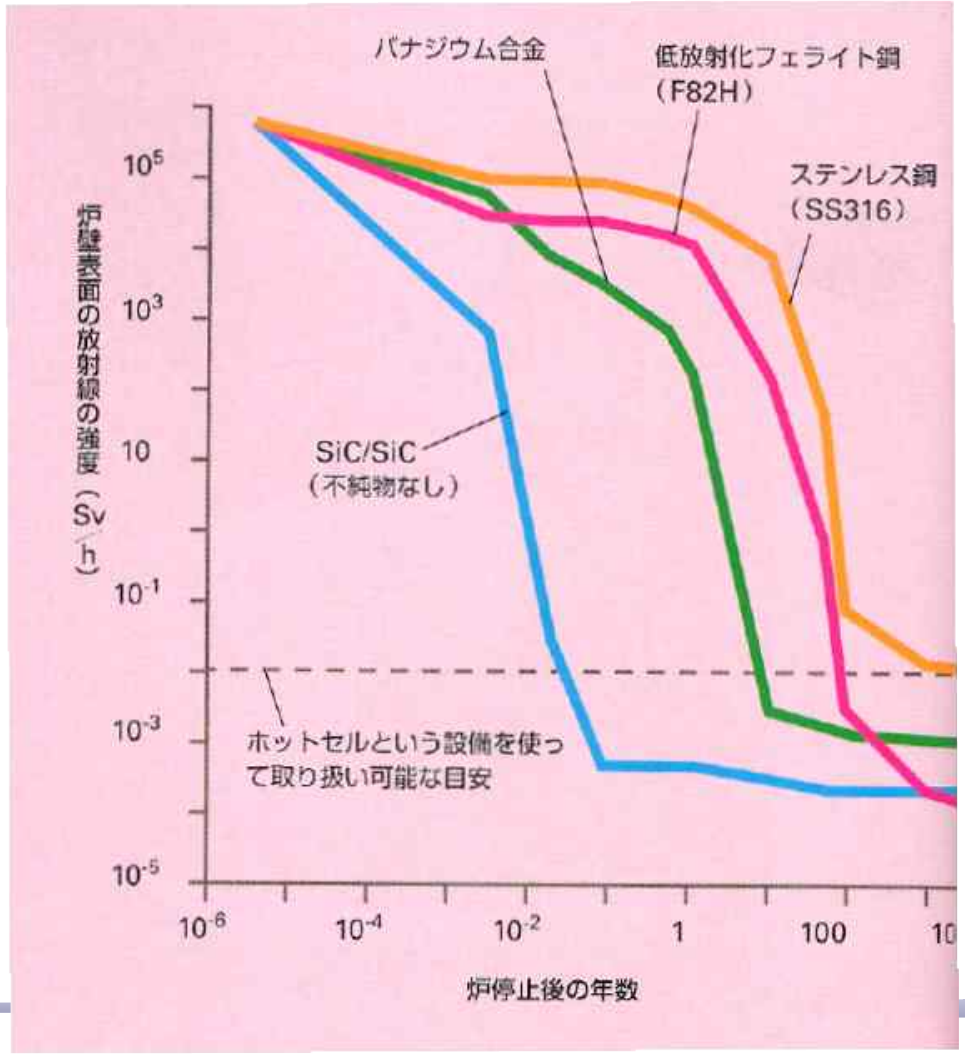
資源（燃料）がほぼ無限にあり、かつ偏在していないどうして言えるの？

H_2O（水）の0.032%はHDO（水素原子が重水素原子と置き換わっている）です。海水（あるいは水）があれば重水素が採取でます。従って、ほぼ無尽蔵にかつ偏在せずに重水素は」存在します。トリチュウム（T）は自然界にはほぼ存在しません。リチュウム（Li）から製造します（炉壁（ブランケット中に）リチュウム化合物を置き炉から出てくる中性子で核変換して作る）。リチュウムも海水中に多量に存在しています。

核融合発電の基礎

燃料に含まれる、あるいは発電時に生成される放射性物質は取り扱いが比較的容易てどうして言えるの？

放射性物質の三重水素の半減期は約12年で、発電中に中性子により放射化される炉壁内の物質も約100年程度管理すれば取り扱い容易な放射線量になります。



ニュートン別冊2015年5月水素社会　p126 より

核融合発電の基礎

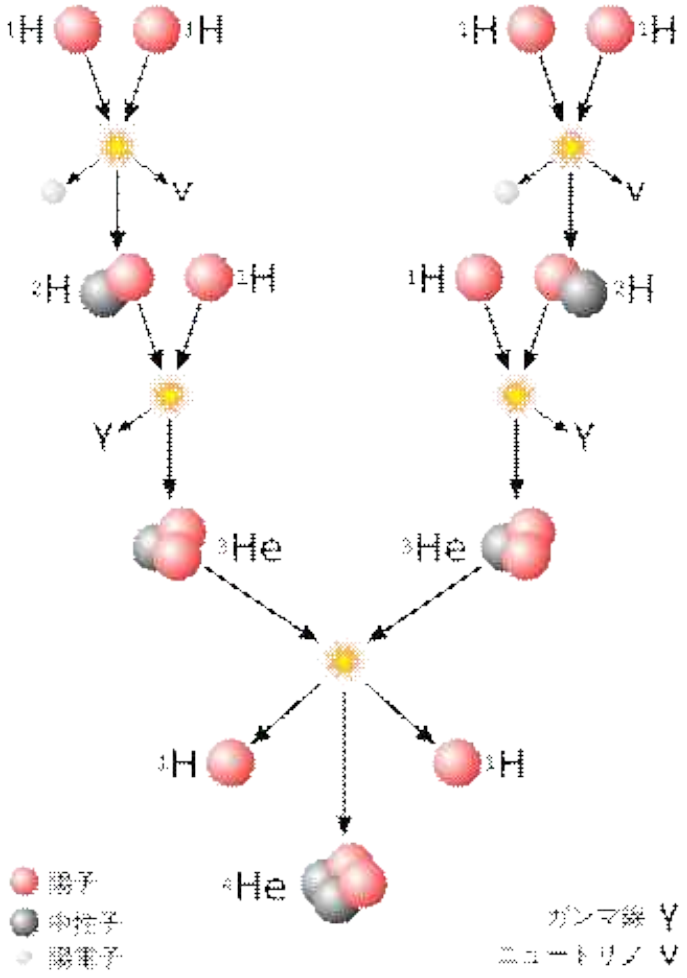
水1リットルで灯油約80リットルのエネルギーが発生？

これはDD反応の話です。
　水1リットル中には約1.0×10^{22}個の重水素原子が含まれています。これらがすべて核融合反応すると約1.8×10^{22}MeVのエネルギーを放出します。これは7×10^{8}カロリーに相当します。
一方、灯油1kg発生するエネルギーは約1.1×10^{7}カロリーで、比重は0.8g/cm^{3}程度です。従って、7×10^{8}カロリーに相当する灯油の体積は
$7\times10^{8}\div1.1\times10^{7}\div0.8\sim80$リットル　となります。

核融合発電の基礎

太陽で起きている核融合反応と同じ反応？

太陽では右図のような陽子－陽子連鎖反応がメインで起きています（トータルでは4個の水素原子からヘリウム4が生成）。
　一方、核融合発電ではDT反応を使用する予定です。



図はウィキペディアより

核融合発電の基礎

プラスの電荷を持つ原子核同士がクーロン反発力に打ち勝って核融合させるのに必要なエネルギーは？

　重水素と三重水素の原子核が近づくと核力が働き融合します。従って、クーロン力に打ち勝って核力が効くほどの距離まで近づけるエネルギーを持った重水素と三重水素の原子核は核融合反応します。

　そのエネルギーは約300keVと計算できます。温度に換算すると30億度ですが、エネルギー分布の効果（マックスウェル分布の高エネールギー成分の効果）やトンネル効果のため温度は1億度程度でよいとされています。

核融合発電の基礎

核融合発電では重水素と三重水素のプラズマ（おおざっぱにいうと電子と原子核がバラバラの状態になった集合体）を閉じ込めて核融合反応を生じさせエネルギーを取り出します。その時のキーワードは何？

キーワード3つあります。

プラズマの温度（T)と
密度（n）そして
エネルギー閉じ込め時間（τ_E)

T ~ 10keV（1億度）、$n\tau_E \sim 1.4\times10^{20}m^{-3}s$（ローソン条件）以上のパラメータが達成できるとと正味のエネルギー出力が得られると考えられています。

核融合発電の基礎

超高温プラズマ（10keV以上）までどのようして加熱するの？

トカマクではトロイダル電流を流すことにより、電熱器と同じ効果で約2keV程度まで温度を上昇させることができます。しかし、温度の上昇に伴いプラズマの抵抗値が下がり、加熱効率が低下します。そこで、より高温にするには、超高温（200keV程度）の中性粒子ビームを打ち込んだり（NBI）、電磁波で加熱したり（電子レンジのように）して10keV（1億度）以上の温度を達成します。

核融合炉の候補

T ~ 10keV（1億度）、$n\tau_E$ ~ $1.4\times10^{20}m^{-3}s$以上という条件を満たす核融合炉はどのようなもの？

T（プラズマの温度）が満たされた場合、
$n\tau_E$ ~ $1.4\times10^{20}m^{-3}s$以上を満たす方法としては、
n（密度）を高くするか、
τ_E（エネルギー閉じ込め時間）を長くする方法が考えられます。

n（密度）を高くする・・・慣性核融合炉
（レーザーなどを用います）
τ_E（エネルギー閉じ込め時間）を長くする
・・・磁気閉じ込め核融合（トカマクなど）

ここでは研究が最も進展しているトカマク炉について紹介します。

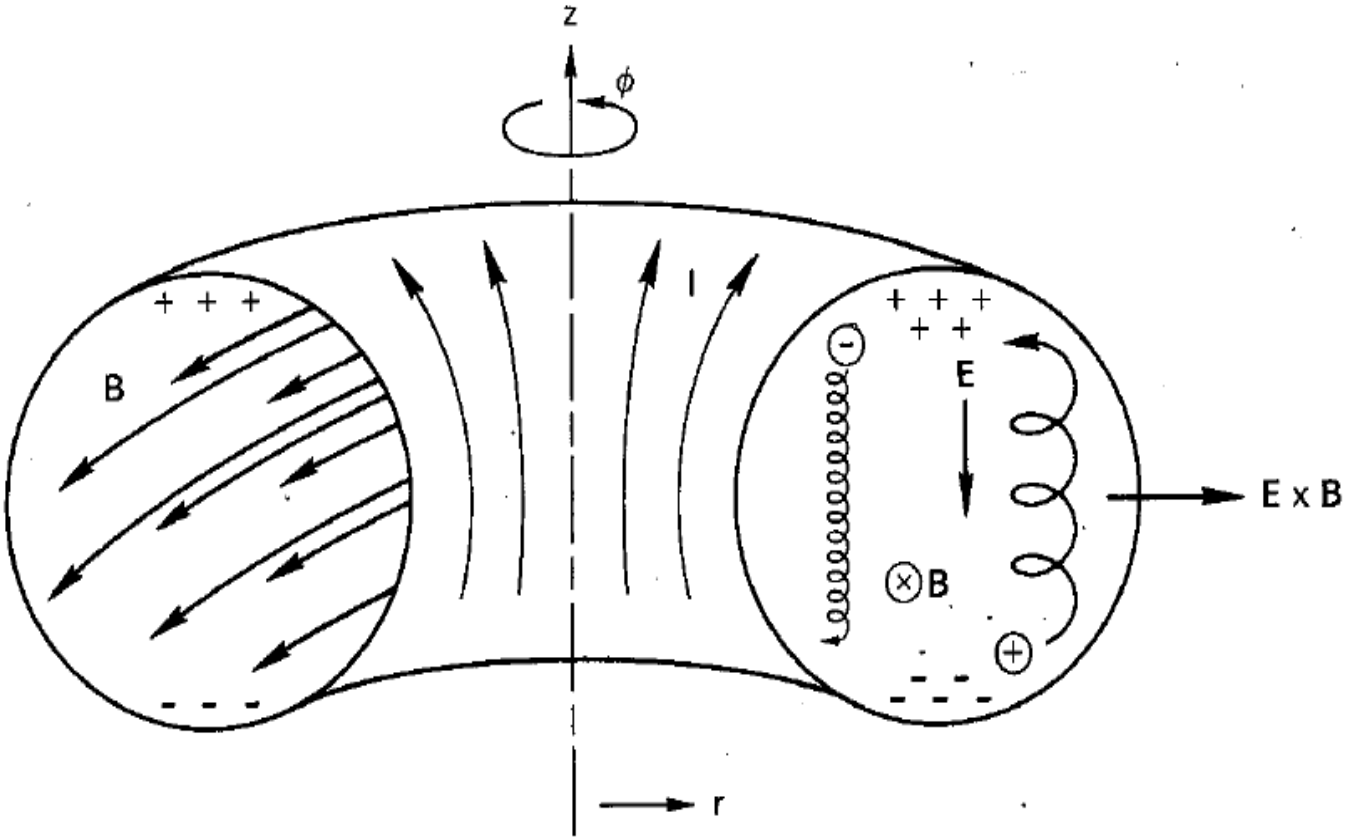
磁気閉じ込めとトカマク

10keV（1億度）のプラズマを長時間閉じ込めておくことが可能な容器は存在しません。では、どのようにして高温プラズマを必要な時間保持するのでしょうか？

　磁気閉じ込めでは、磁場によって真空容器からプラズマを離し保持します。荷電粒子（プラズマ内の原子核や電子）は磁力線にからみつくようにらせん状に運動します。この性質を使い、円状の磁力線を作り（例えば、円形のコイルをドーナッツ状に並べそのコイルに電流を流す）その磁力線にからみつけてプラズマを保持します。しかし、単純なドーナッツ状磁力線（単純トーラス）では、荷電粒子のドリフト運動（磁力線を横切る運動）のため、プラズマは外側に逃げていまいます（次のスライド参照）。

磁気閉じ込めとトカマク

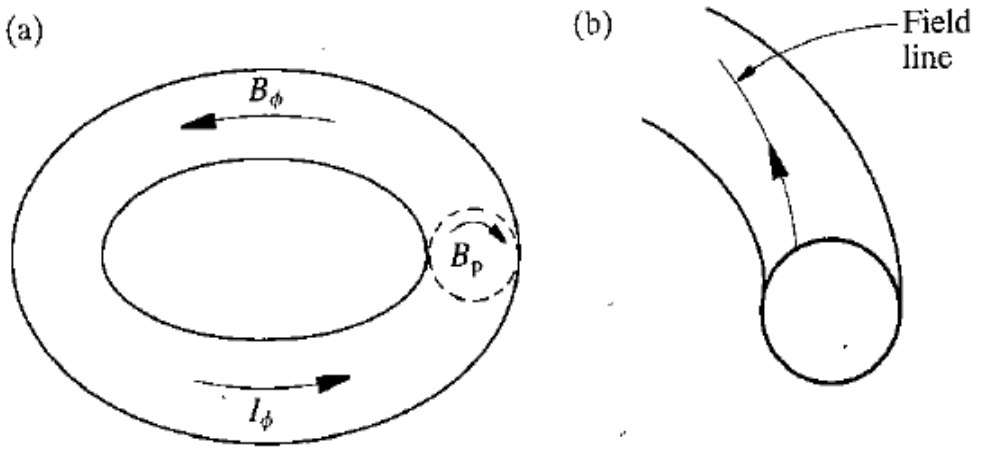
単純トーラスからプラズマがE×Bドリフトで流失する様子



磁気閉じ込めとトカマク

ドリフト運動によるプラズマ流失を防ぐためトカマクではどうしているのでしょうか？

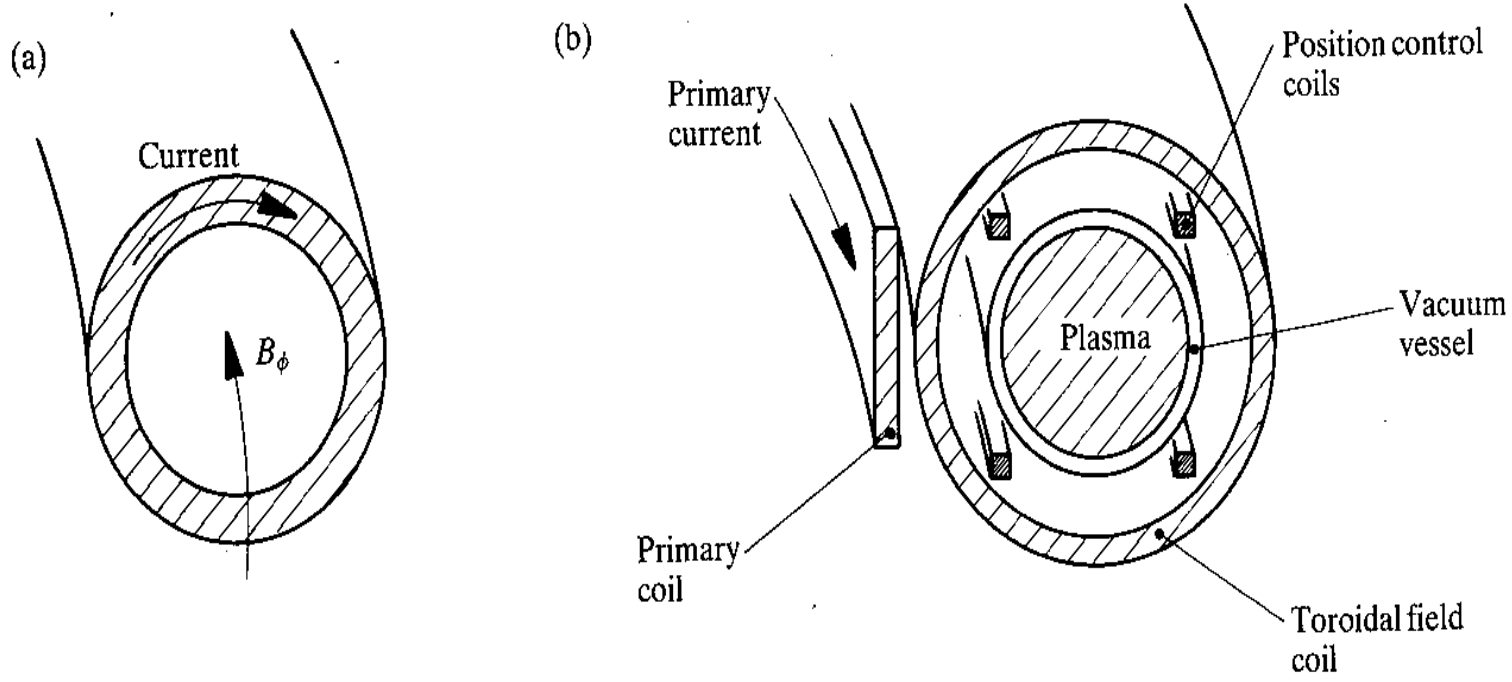
　トカマクでは単純トーラス磁場（B_Φ）中にトーラス方向（ドーナッツ（Φ）方向）に電流（I_Φ）を流しトーラス磁場を巻く方向の磁場（B_p）を発生させます。その重畳した磁力線はらせん状の形状となります（回転変換といいます）。その結果、ドリフト運動によって上下に分離していたプラスとマイナスの電荷が中和し、その電場によって発生していたE×Bドリフト（プラズマ流失の原因となっていた）を防ぐことができます。



「Tokamaks」p12 (by JOHN WESSON, OXFORD SCIENCE PUBLICATIONS 1985)より

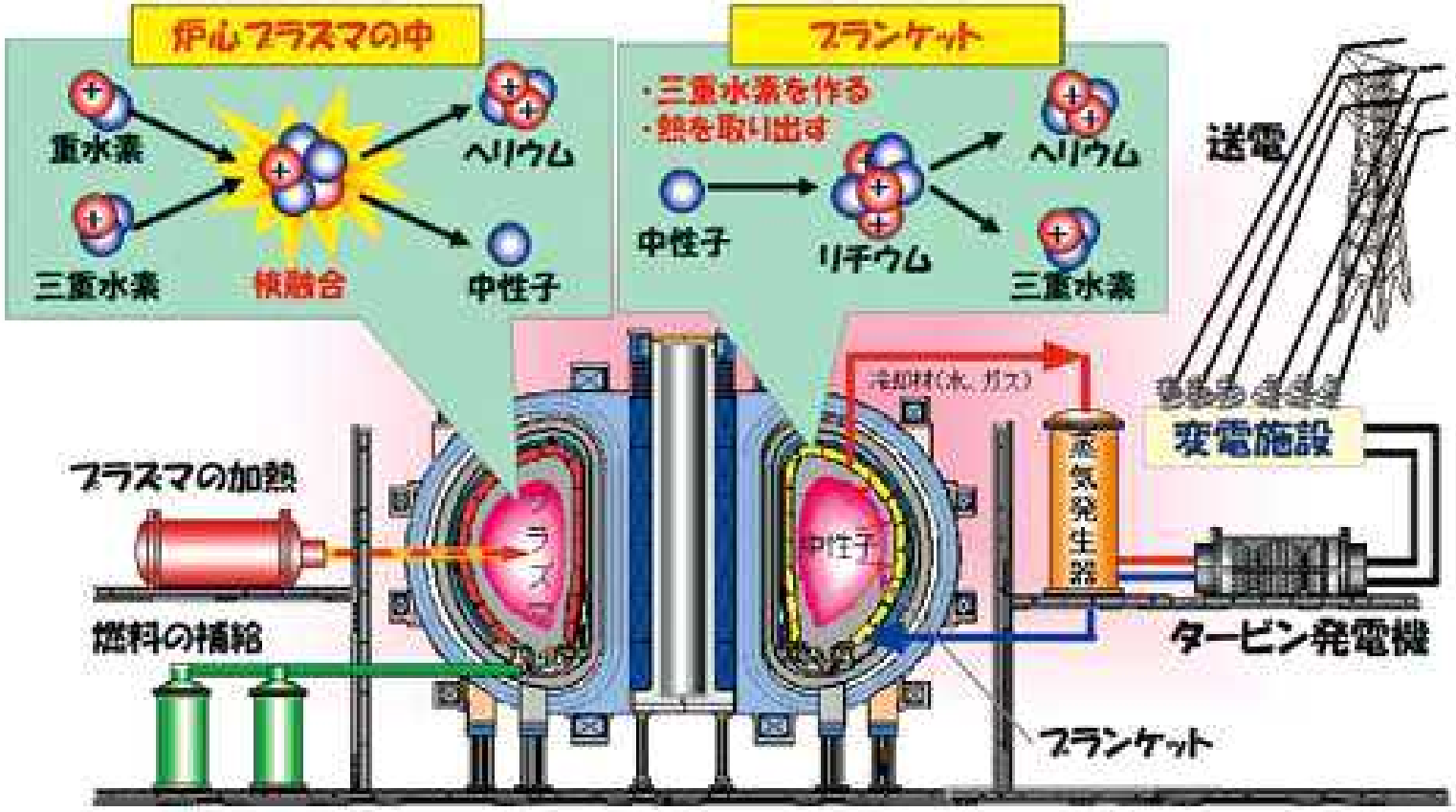
磁気閉じ込めとトカマク

トカマクではトロイダルコイルでB_ϕを作ります。そしてプライマリコイルにプライマリ電流を流すことでプラズマ中にトロイダル方向の電流を流しポロイダル磁場B_pを作ります。



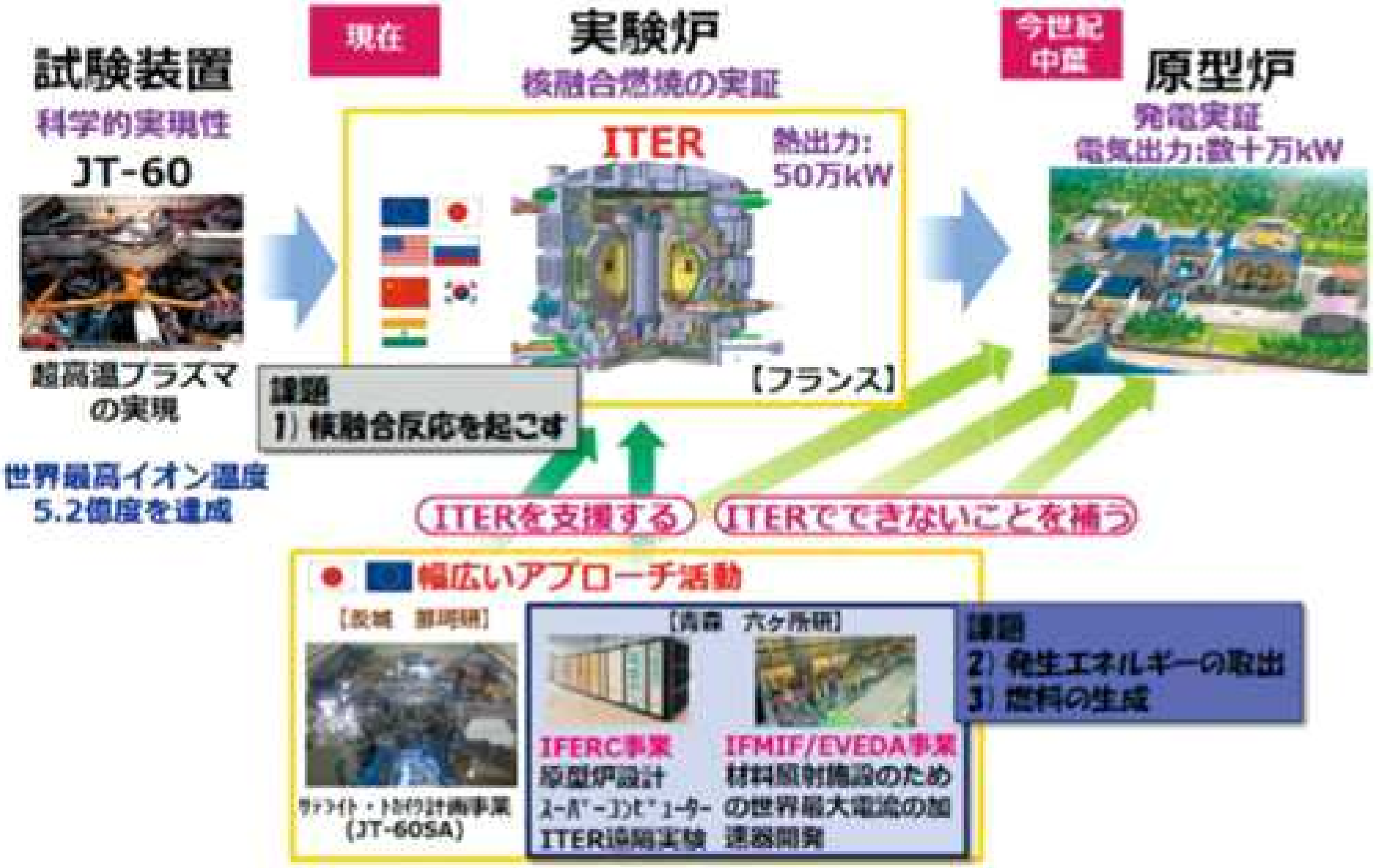
「Tokamaks」p13 (by JOHN WESSON, OXFORD SCIENCE PUBLICATIONS 1985)より

トカマク炉（機械学会誌より）



https://www.jsme.or.jp/kaisi/1264-04/より

核融合炉開発の現状と将来予測（機械学会誌より）



https://www.jsme.or.jp/kaisi/1264-04/より