

解 説

核融合科学研究所大型ヘルカル実験装置とトリチウム

佐久間洋一

核融合科学研究所安全管理センター
〒494-01 名古屋市千種区不老町

Large Helical Device at National Institute
for Fusion Science and Tritium

Youichi SAKUMA

Safety and Environmental Center, National Institute for Fusion Science
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01, Japan
(Received September 17, 1996 ; accepted December 20, 1996)

Abstract

Energy is a vital necessity for humans life and we have been consuming a large amount of fossil fuel especially since the beginning of the industrial revolution. Nowadays, this large consumption of energy is now threatening our daily lives and what we need now are nonfossil fuels, for instance, solar energy, biomass energy, nuclear energy, etc. Fusion energy is unlimited as an energy resource and one of the strongest candidates as a future energy source.

At the National Institute for Fusion Science, we are developing and constructing a new fusion experimental device called the Large Helical Device. This device will be able to generate a small amount of tritium, as a fusion product. To remove it from the exhaust gases, we have designed a tritium cleanup system based on a innovational new concept. This system is mainly consists of a palladium permeator, decomposer and hydrogen absorbing alloys. It will be able to perfectly recover tritium without oxidizing it.

1. はじめに

エネルギーは人間にとって欠くことのできないものであり、人類の歴史はエネルギーをいかに獲得し制御するかという歴史でもあった。火を使うことから始まったエネルギーの使用は、18世紀半ばに石炭を燃やす蒸気機関を利用して産業革命が始まると、飛躍的に増大していった。その後石炭から石油、天然ガスなどへと主力は移っても、それら化石燃料が現在に至るまでエネルギー源の重要な部分を占め続けている。第二次世界大戦後、ウラ

ンの核分裂エネルギーを利用した発電が実用化され、地熱や太陽光も多くはないがエネルギー源として利用されるようになった。しかし、化石燃料の使用量は増え続け、その使用量の増大は資源の枯渇と環境破壊のふたつの面から、人類の生存そのものを脅かすようにまでなっている。化石燃料使用に伴う硫酸化物や窒素酸化物の排出は、先進国ではある程度抑制されるようになってきてはいるが、使用量が急増しつつある発展途上国ではほとんど規制できていない。ましてや制御が難しい地球温暖化の原因物質のひとつである炭酸ガスの放出はようやく規制が始まろうとしている段階である。したがって、環境に対する影響が少ないエネルギー生産が人類にとって極めて重要な課題となっている。

地球環境に与える影響の小さい非化石燃料エネルギー源としては、風力、地熱、波浪、潮汐、潮流、海洋温度差、太陽熱、太陽光、バイオマス等と原子核エネルギーがある。それらの内、原子核エネルギーはかなり実用化され、それ以外はある程度実用化されたり開発研究が進められている段階である。地熱発電所は我が国でも数か所実用化され、小規模な風力発電所や潮力発電所を持つ国もある。また、太陽光は太陽電池として電卓や街灯、灯台、人工衛星などでかなり使われている。しかし、この中で将来のエネルギー源として人類の需要をある程度まかなえる可能性があるのは太陽光発電とバイオマスと原子核エネルギーだけであろう。バイオマスや太陽光発電にしても人類の需要の全てをまかなうことは困難であり、大規模な実用化にもいろいろ解決すべき難しい問題がある。したがって、人類は原子核にかかわるエネルギーを利用してゆかねばならない。原子核エネルギーの利用は、原爆に始まったという不幸な歴史を持っているが、これを安全に平和に着実に利用することは、人類におわされた義務ともいえるだろう。原子核エネルギーの正しい利用が人類の未来を制御するといっても過言ではない。その中で核融合の位置づけと核融合科学研究所が建設を進めている大型ヘリカル装置とそのためのトリチウム除去装置について以下に述べる。

2. 核融合エネルギー

原子核エネルギーを利用するには2つの方式がある。ひとつはウランやプルトニウムのような重い原子核を分裂させることによってエネルギーを得る方式である。もうひとつは水素のように軽い原子核どうしを融合させて大きな原子核にすることによってエネルギーを得るといふ1番目の方式は原子力発電所として実用化されているが、ウランの資源がそれほど豊富でないことと放射性的核分裂廃棄物を生成するという問題を抱えている。資源については海水中からウランを取り出すことやウラン-238をプルトニウム-239に変換して燃やす高速増殖炉で解決するということもできる。また、量的にはウランよりかなり多く存在するトリウム-232をウラン-233に変換して燃やすこともできる。ところが、海水ウランはコストが高く、高速増殖炉は「もんじゅ」の例でもわかるように技術的に難しくかつプルトニウムが原爆に結びつきやすい。また、トリウム炉も余り研究が進んでおらず、

まだ実用化にはほど遠い状態にある。

2番目の方式が核融合と呼ばれるもので、太陽はこのエネルギーによって光り輝いている。核融合反応は核分裂と反対に小さな原子核を融合させることによってエネルギーを得る方式である。太陽を始めとする恒星のエネルギー源は核融合反応であり、太陽の中では4個の水素（軽水素）原子核が反応して1個のヘリウム-4の原子核ができる反応が起きている。地球上で得られるエネルギーのほぼ全ては太陽起源であるので、核融合エネルギーで地上の生命は育まれているといえる。地上でうまく制御しながら核融合反応が起こしてエネルギーを得ることができれば、人類はほぼ永久にエネルギー問題から開放されるものと期待されている。

原子核を構成している核子（陽子と中性子）は核力というごく近い距離のみで働く非常に強い力で結びつけられている。核融合反応させるためには、原子核と電子がばらばらになったプラズマ状態で原子核どうしをクーロン力に打ち勝って核力の働く距離まで近づかなければならない。太陽では自身の巨大な重力によってプラズマが閉じ込められて、約1400万度の温度でゆっくりと核融合反応が進行している。太陽は非常に体積が大きいので表面積の割合が小さく、表面から逃げるプラズマが少なく損失が小さくなっているそのようなことが可能になる。比較的低温低密度のプラズマ中でゆっくりと核融合反応が起きているので、太陽は約百億年もの寿命を持っているのである。しかし、地上で人類がプラズマを閉じ込めて核融合反応を起こしてエネルギーを得るには、遥かに小さい体積で高いエネルギー密度を実現しなければ役に立たない。そのためにはローソンの条件と呼ばれている臨界条件を達成する必要がある。それは密度 (n) と 温度 (T) と 閉じ込め時間 (τ) の三重積が、ある一定値以上にならないと核融合反応が持続しないというものである。反応させる核種の組み合わせによるが、DT反応ではプラズマの温度が1億度以上、密度が1立方メートルあたり 10^{20} 個以上、閉じ込め時間がおおよそ2秒以上という厳しい条件である。ローソン条件を達成して核融合反応を起こさせ、その熱を電気エネルギーに転換して利用しようというのが核融合炉である。

電気への変換方式は、核分裂炉と同じように水蒸気を媒介にして発電機を回す方式が主として検討されている。また、プラズマの流れを直接電気に変換するMHD発電（電磁流体発電）も研究されている。

Fig. 1 に示したように軽い核種の原子核の結合エネルギーはかなり小さいので核融合によって大きなエネルギーを得られることがわかる。こ

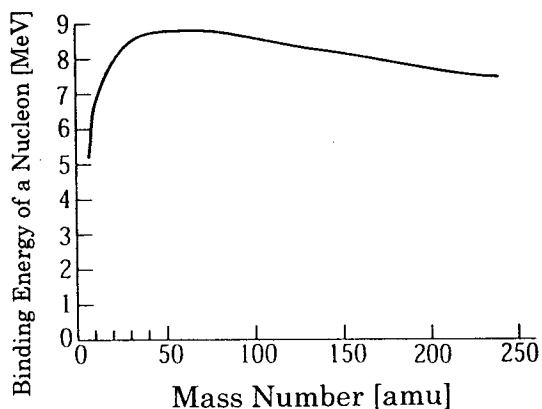


Fig.1. Massnumber vs. binding energy.

の方式は資源が無尽蔵といってよいほど豊富なことと、誘導放射能の生成はあるものの核分裂に比較して放射性廃棄物の問題が少ないという長所を持っている。核融合エネルギーが実用化されれば人類はエネルギー問題から開放されることであろう。それは、膨大な量の海水に比率は小さいとはいえ含まれている大量の重水素を燃料とすることができるからである。最も実現しやすいと考えられている重水素Dと三重水素（トリチウム）TによるDT反応の場合には重水素は海水中の重水から取り、トリチウムはリチウムに中性子を当てて造るが、地球上の存在量はそれほど多くない。次に実現しやすい重水素どうしの反応の燃料は全て海水中にあり、1立方メートルの海水が約250立方メートルの石油に相当する。したがって、人類が10億年使えるほどのエネルギーが海水中に存在する計算になる。しかし、太陽のように軽水素を燃やすことは非常に難しい。人工的に核融合炉でエネルギーを取り出せる可能性のある反応の主なものには次のようなものがある。



ここで、Hは ${}^1\text{H}$ 、Dは ${}^2\text{H}$ 、Tは ${}^3\text{H}$ 、nは中性子、pは陽子をそれぞれ表している。この中で最も反応を起こし易いものは(1)の重水素と三重水素（トリチウム）を反応させるいわゆるDT核融合反応である。そして、(2)(3)(4)と次第に反応を起こさせるのが難しくなってゆく。(2)の重水素同志のDD反応は燃料がほぼ無限になることが強みである。(3)の重水素とヘリウム-3の反応はトリチウムや放射線の問題が小さいことが特徴である。(4)の軽水素とホウ素-11の反応では中性子が発生しないので材料の放射化が起らず熱の取り出しも容易である。

それではそのような高温のプラズマをどのようにして閉じ込めたらよいのだろうか。高温のプラズマを容器の壁に接触させて閉じ込めることはもちろん不可能である。そこで磁場を使って閉じ込めたり、あるいは瞬間的に非常な高密度プラズマを作って閉じ込め時間の短さを密度で捕ったりするのである。電子とイオンから成るプラズマは磁力線に沿って回転運動をする性質がある。その性質を利用して閉じ込めるのが磁場閉じ込め方式の原理である。磁場を使う方式にドーナツ型（トーラス型）と直線型とがある。Fig. 2におもな4つの閉じ込め方式の略図を示した。始めの3つが磁場閉じ込め方式、残りのひとつが慣性閉じ込め方式である。(a)はトーラス型のひとつでトカマク方式とよばれている。ドーナツ状の磁場では磁力線が閉じているのでプラズマを容易に閉じ込められる。しかしプラズマが磁力線に沿って回転しているうちに遠心力によって外側に逃げてしまう。このドリフトと呼ばれる現象を抑えるためにプラズマ自身に電流に流して扱った磁場を作ると同時

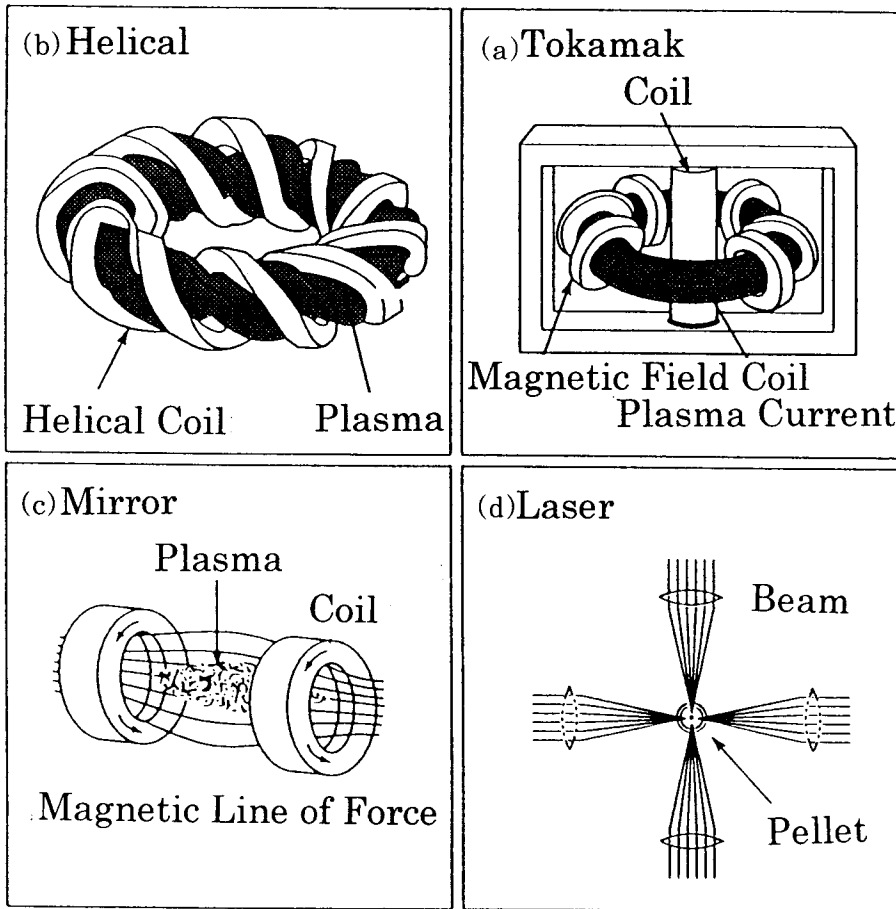


Fig.2. Four main plasma confinement systems

に加熱も行っているのがこの方式の特徴である。(b)はヘリカル型でプラズマのドリフトを抑えるために外側の捩れたコイル（ヘリカルコイル）で捩れた磁場を作っている。プラズマに電流を流さないので連続運転が容易である。また、プラズマの断面が楕円形となり長径の端からプラズマ中の不純物や燃えた灰（ヘリウム-4）を排出しやすい。(c)はミラー型と呼ばれ、プラズマと磁力線の性質をうまく使い、直線的な磁力線の両端を絞って鏡のようにプラズマを反射させる方式である。トーラス型に比べて装置が簡単で、エネルギー密度を高くできる。両端でプラズマを完全に反射させることはできないが漏れ出るプラズマを利用して直接発電が可能である。(d)は慣性閉じ込め方式のひとつのレーザー方式で、ペレット状の燃料を四方八方から強力なレーザーで照射して核融合反応を起こさせる方式である。レーザーに照射されて瞬間的に高温になって膨張する燃料はプラズマ状態となって内側にも高速で進む。非常に短い時間であるけれども、中心部に密度の高い高温プラズマができて反応するのである。

3. DT核融合

世界中で実用化に向けて最も研究が進んでいるのは(1)のDT反応をトカマク型の炉で起こす方式である。それはDT核融合反応が他の反応よりも起こりやすいからである。また、単位質量あたりのエネルギー所得量も(3)と並んでこの反応が大きい。これらの点を考えると、差し当たり実用化する可能性が高いのはDT核融合反応である。DT核融合反応の燃料は言うまでもなく重水素(D)とトリチウム(T)である。重水素は浸水の中に重水の形で約150ppm含まれているのでほぼ無尽蔵である。一方、トリチウムは天然にはほとんど存在しないので、リチウム-6に中性子を当てて下記のような反応を起こさせて製造する。



このとき、中性子源としては(1)の反応で発生する中性子を利用する。結局DT核融合反応では(1)と(5)の反応を合わせた(6)の反応によってエネルギーを得ることになる。



リチウム-6は天然に存在するリチウムの中に約7.7%含まれている。DT核融合反応を利用する核融合発電炉の仕組みは概念的にはFig.3のようになる。この発電炉では、天然に存在する重水素とリチウム-6から電気を造ることになる。燃焼廃棄物はヘリウム-4だけであるので、廃棄物の処理処分は問題ではない。ただし、反応で発生する中性子が炉

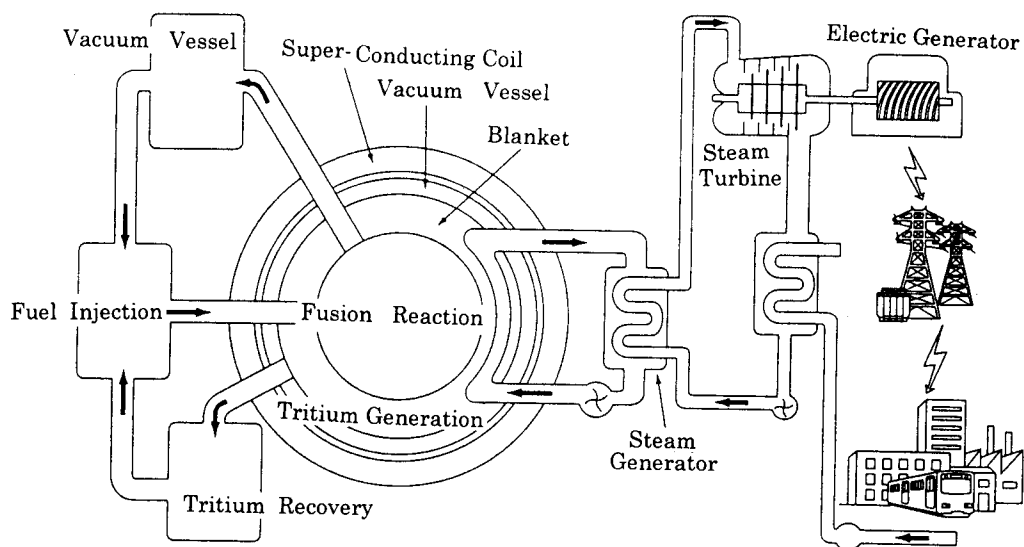


Fig.3. Conceptual design of fusion nuclear plant

の構造材を放射化することがある。これは構造材にどのような材料を用いるかによって大いに異なるが、DT核融合炉の解決すべき大きな課題のひとつである。もうひとつの大きな課題は、放射性物質であるトリチウムを常に生産してある程度の量を保持していなければならないということである。トリチウムは水素の同位体のひとつであるから漏洩しやすく、また多くの金属に吸着されやすい性質を持っている。

核分裂反応や核融合反応で発生するエネルギーはMeVの単位であり、eV単位の化学反応のエネルギーに比べて百万倍も大きい。単位質量あたりの発生エネルギーでは、DT核融合反応はウラン-235の核分裂反応の3.5倍となる。しかし、プラズマ加熱や閉じ込めに使うエネルギーを勘案すると核融合も核分裂も正味の所得エネルギーはそれほど変わらないと考えられる¹⁾。また、燃料資源量も高速増殖炉まで勘定に入れると、ウランを燃やす核分裂とトリチウム-6を燃やすDT核融合はそれほど異なる¹⁾。したがって、次のような点がDT核融合のウラン核分裂に対する有利な点である¹⁾。

- ・放射線放射能の問題が小さい
- ・炉が暴走することがない
- ・燃料の取得が容易
- ・兵器との関連が少ない
- ・次のDD炉に技術がつながる

放射線放射能の問題は前述のように、構造材料の放射化などの問題のあるものの核分裂より有利であることには間違いがない。炉の暴走は本質的に起こり得ない。燃料はトリチウム-6の同位体分離が必要となるかもしれないが、ウラン-235の分離よりはるかに容易である。トリチウムやトリチウム-6は水爆の原料であるもののそれ自身では爆弾とはならず、起爆剤としては原爆を必要とする。DT核融合で培われた技術は次のDD核融合の技術開発につながってゆく。

一方、DT核融合炉を実現するには解決すべき難しい問題が幾つもある¹⁾。

- ・反応が非常に起こりにくい
- ・エネルギー密度が低い
- ・建設や運転に必要なエネルギーが大きい
- ・エネルギー転換技術が未確立
- ・開発建設費が膨大

などである。核融合エネルギーを実用化するためには、このような問題を克服してゆかねばならないのである。

それでは核融合エネルギーの開発はどのような状態にあるのだろうか。核融合の研究は世界中の主な先進諸国で行われている。現在最も研究が進んでいるのはトカマク方式で、ヨーロッパ13ヶ国が共同で建設したイギリス（連合王国）オックスフォード郊外のカラムにあるJET（Joint European Torus）、アメリカ合衆国プリンストン大学プラズマ理学研

究所にあるTFTR (Tokamak Fusion Test Reactor), 日本原子力研究所のJT-60 (JAERI Tokamak-60) という装置ではDT核燃焼が起き始める臨界条件まで到達している。その他にも、ヘリカル型として核融合科学研究所が建設中のLHD (大型ヘリカル実験装置), ドイツのベンデルシュタインⅦという装置がある。ミラー型では発展したタンデムミラー式のGAMMA10という装置を用いた研究が筑波大学で進められている。レーザー核融合の実験装置は大阪大学レーザー核融合研究センターの激光12号という装置が成果をあげている。核融合の研究には非常に大きな装置が必要であり次の実験装置は世界各国が協力して建設しようとしている。現在設計が進められているのはITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) というトカマク方式の大型装置である。この国際協力には日本, アメリカ合衆国, ヨーロッパ連合とロシアが対等な立場で協力しあって研究を進めている。

将来の核融合炉がどのような型になるかまだわからないが, トカマク型の計画ではITERでプラズマ閉じ込めの振る舞いを確認すると共に, 核融合炉に必要な工学的試験を行う。その次の段階として原形炉 (DEMO炉) の建設を2030年頃に予定している。その後発電をする核融合炉が建設されるので, 核融合炉から電力が供給されるのは21世紀後半頃になると考えられる。しかしこれも他のエネルギー源の需給状況や地球温暖化との関係あるいは技術的な問題もありあまり明確ではない。

4. 大型ヘリカル実験装置とトリチウム除去装置

核融合科学研究所は核融合の研究を行う国立大学共同利用機関である。大学等における核融合研究の推進方策については, 文部大臣の諮問機関である学術審議会において検討され, 1980年11月に, 同審議会から「大学等における核融合研究の長期的推進方策について」の建議が文部大臣に提出された。その後引き続き, 学術審議会特定研究領域推進分科会融合部会において, 核融合研究の動向等について検討が重ねられ, 検討の結果新たに外部導体系統大型ヘリカル装置計画を策定するのが適当ということになった。学術審議会の検討等を踏まえて具体的方策について調査検討するため, 調査研究協力者会議が文部省に設置された。検討の結果, 1988年4月に大学における核融合研究の新大型研究計画として「次期大型ヘリカル装置計画の概要」とその推進母体として「核融合研究所 (仮称) の組織」についての報告が取りまとめられた。それを受けて, 名古屋大学に創設準備委員会及び核融合研究所 (仮称) 創設準備室が設置され, 具体的な建設の準備に入った。このような経緯の後, 国立学校設置法施行令が改正され, 名古屋大学プラズマ研究所を改組転換すると共に, 京都大学ヘリオトロン核融合研究センターの一部及び広島大学核融合理論研究センターの一部を移管して核融合科学研究所が設置されることになった。1989年5月29日の予算成立に伴って正式に核融合科学研究所 (以下「核融合研」とする) が発足した。一方では, 次期装置等の建設のための用地の取得についても調査研究が行われ, 1987年に岐阜県

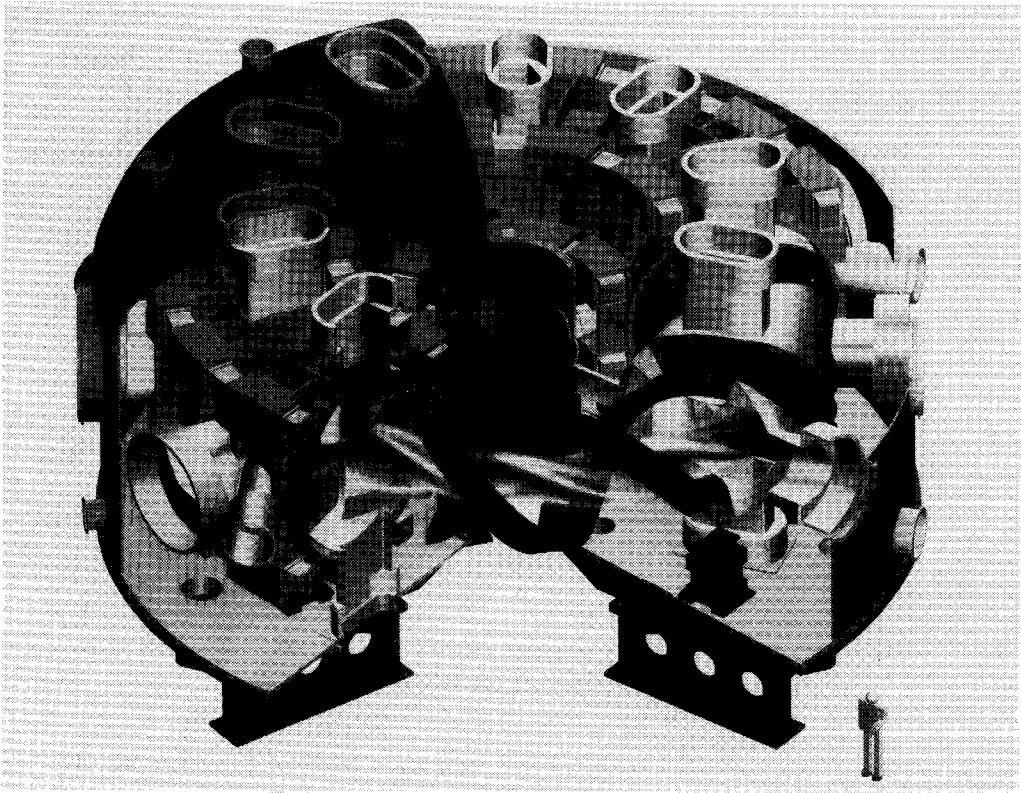


Fig.4. Conceptual drawing of LHD at completion

土岐市に用地が購入された。

現在、核融合研はこの用地にFig.4のような大型ヘリカル装置（LHD）の建設を進めている。この装置で2000年以降に予定されている第2期実験装置において、重水素を用いるDD実験を行う計画である。その際年間最大430GBqという微量ではあるがトリチウムが発生する。これはDT核融合の研究とは異なってはるかに少ない量のトリチウムである。核融合研の方針としてトリチウムの外部放出は可能な限り行わないことにしている。そこで、安全管理センターが中心となってトリチウム除去装置の開発を行っている。LHDとその建屋に対するトリチウム除去装置としてFig.5に示すような系統を想定している。すなわち、トリチウム除去装置は、LHDの排気系と室内空気系の2系統からなっている。室内空気系は通常用いられている「触媒酸化+モレキュラーシーブ吸着」方式（以下「湿式」とする）である。ただし、LHDの実験室は容積が約20万立方メートルもあるので、水蒸気透過膜を用いて装置の大型化を伴わずに処理流量を大きくしている。トリチウムを含む装置の排気系用として従来から用いられているのも湿式である。しかし、トリチウムの人体に対する影響は、水蒸気型（以下「HTO型」とする）の方が元素型（以下「HT型」とする）よりも

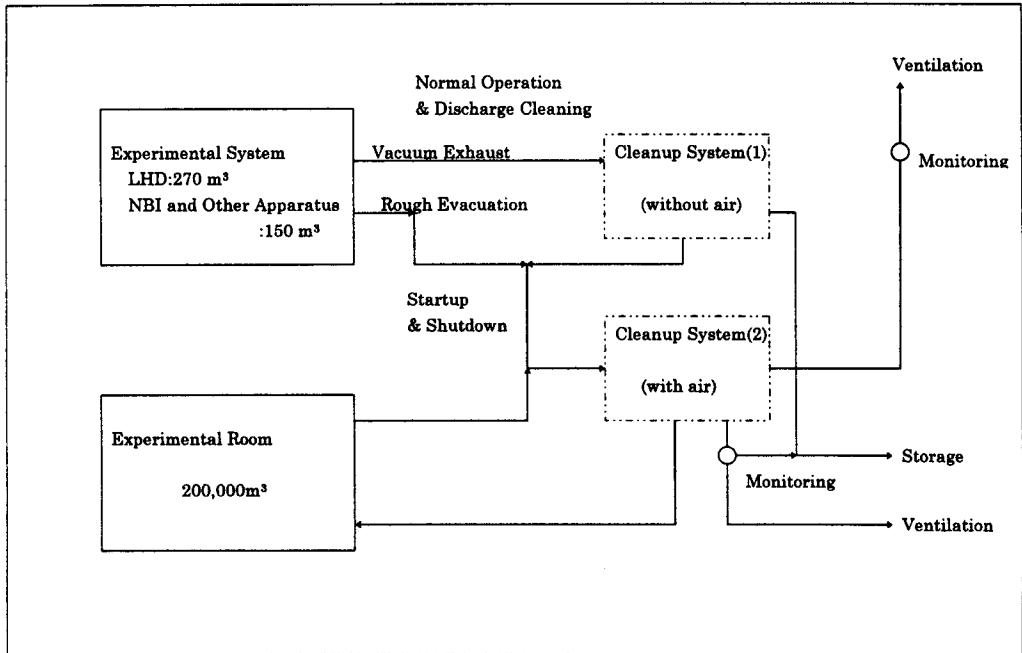


Fig.5. Total flow chart of the tritium cleanup system

1 万倍以上影響が大きいといわれている。Table 1 に示したように、放射線障害防止法においても水蒸気型のHTO型よりもはるかに厳しく規制されている。LHDから排出されるトリチウムはほとんどがHT型(実際にはDT)であり、トリチウム化メタンとHTO型(実際にはDTO)も微量

含まれると考えられる。筆者等は、このトリチウムを酸化してHTO型にすることなく、直接金属水素化物として処理する乾式装置の採用を検討した。

以下に現在進行中の装置の概念設計について説明する。乾式法には、

- ・人体に対する影響が大きいHTOが発生しない。
- ・排気中のトリチウムの量を極度に低減できる。
- ・装置の小型化が図れる。

という3つの長所がある。従来この方式が採用されなかったは、

Table1 Legal regulation levels of tritium in air [Bg/m³]

Chemical form	Q ₂	Q ₂ O
Regulations		
Labo. air	2.0 × 10 ¹⁰	7.0 × 10 ⁵
Exhaust air	9.0 × 10 ⁷	5.0 × 10 ³

N.B.Q means an isotopes of hydrogen (H, D, T)

- ・装置が高価になる。
- ・HT型以外の成分が処理できない。
- ・微量の酸素が吸着金属に悪影響を与える。
- ・廃棄物の量が多くなる。

と考えられていたからである。筆者等はこれらの4つの点を克服して、乾式法のトリチウム除去装置の開発を行った。

LHDによるDD実験において発生するトリチウムがどのような化学形であるか、どこにどのような量が存在するかは正確には予測できない。そこで、除去装置を設計するために、Table 2に示したようにトリチウムが排出されると仮定した。真空排気に含まれるトリチウムは、年間最大発生量の430GBqが毎年度排出されるものと仮定した。

Table 2 Exhaust gas of LHD

Operating condition		Normal operation	Discharge cleaning
Flow rate [Nm ³ /hr]		0.1404	1.4400
Composition [Nm ³ /hr]	He	0.0014	1.4400
	H ₂ , HD, D ₂	0.1359	
	HT, DT	4.27×10 ⁻⁹	3.17×10 ⁻⁷
	H ₂ O, HDO, D ₂ O	0.0003	
	HTO, DTO	8.84×10 ⁻¹²	
	CH _x D _y	0.0028	
	CH _x D _y T	1.77×10 ⁻¹⁰	
Pressure [Pa]		1.3	1.3
Temperature [°C]		20	20
Activity [MBq/Nm ³]	HT, DT	1.50×10 ³	1.07×10 ⁴
	HTO, DTO	3.1	
	CH _x D _y T	30.9	

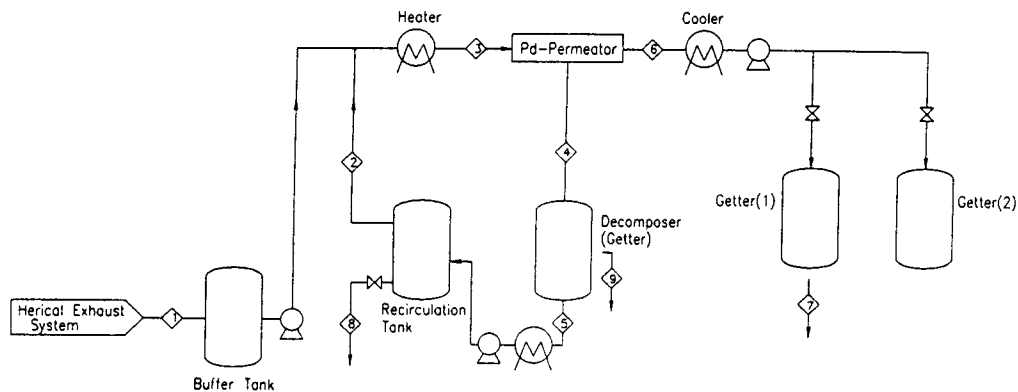
LHDからの排気をまずバッファ槽に溜め、450℃に加熱してパラジウム分離器に入れる。分離器を通過するトリチウムを含む元素状水素を水素吸蔵合金に吸蔵して廃棄物とする。分離されない主としてヘリウム・メタン・炭酸ガス・水蒸気等の成分を非蒸発型ゲッター材に反応させてメタン・炭酸ガス・水蒸気等を分解吸着させる。吸着されないトリチウムを含まないヘリウムは排出する。水素吸蔵合金としては常温での水素平衡圧・比重・取り扱いの容易さ・価格等の観点からチタンを使用。メタン・水蒸気等の不純物処理用の非蒸発型ゲッター材は、メタンに対するデータがあるジルコニウム・アルミニウム合金 (Zr₃Al₂) を用いて設計を行った²⁾。

表3に乾式法と湿式法の比較を、また図6に乾式法の系統図を示す。①発生廃棄物量、

Table 3 Comparison of the dry and wet tritium cleanup system

Item	Dry system	Judg.	Wet system	Judg.
Waste amount	~800kg-alloy/yr. 60L×8	△	~320kg-water/yr	○
Storage space of waste	~30m ³ ×4m/yr Storage in two layer	△	~16m ³ ×4m/yr Storage in 5m ³ vessels	○
Treatment of impurities	Reduction by nonvolatile getter Few data for methane treatment	?	Oxidation by palladium catalyst	○
Safety	Gas phase waste is safer than liquid phase Can be treated as solid except fire and broken at the same time	○	Waste vessels have to be strong	△
System cost	Flow rate is 1/100 compered with wet system Vacuum line is needed	○	Air has to add in order to oxidize hydrogen	△
Concentration of tritium in treated gas	Can be evacuated directly cf. Table 2	○	Can not be evacuated directly cf. Table 2	△
Utilities	Electricity Cooling water Hydrogen Vessels of hydrogen absorbing alloy	○	Electricity Cooling water Humidifying water Pressurized air	○

Fig.6. Flow chart of the dry tritium cleanup system for LHD exhaust



②廃棄物の設置スペース，③不純物処理法，④安全性，⑤設備コスト，⑥排出気体中のトリチウム濃度，⑦必要ユーティリティ，の7項目について比較した。結果は①と②は湿式が有利で廃棄物量は乾式法800kg/年に対し湿式法320kg/年である。③は資料不足で比較は困難である。④⑤⑥は乾式法が有利である。⑦は同程度である。表4に処理後に排気中のトリチウム濃度の計算値を示した。湿式法によりもはるかに優れた値であり，湿式法ではそのまま外気に排出できない濃度であったHTO型（水蒸気）のトリチウムも乾式法ではそのまま排出できる濃度まで除去することができることがわかった³⁾。

概念設計の結論は，L H Dの排気処理法として乾式法が湿式法よりも優れていることを示している。分解ゲッターのメタンに対する性能を確かめるために，更に実験的研究が必要である。

Table 4 Tritium concentration after treatment by the dry and wet system [Bg/m³]

Chemical form	Q ₂	Q ₂ O
Dry system	1.4 × 10 ³	64.9 × 10 ³
Wet system	0.3 × 10 ³	0.0 × 10 ³

N.B. Q means an isotope of hydrogen (H,D,T)

References

- 1) 道家達将, 垣花秀武他, 現代産業技術, 放送大学振興会, 156頁 (1992)
- 2) Heimbach, H.R.Ihle and C.H.Wu, Removal of Nitrogen and Methane from Hydrogen by Metal Getters, Fusion Technology 1984, Vol. 1, 421-426 (1984)
- 3) Y. SAKUMA, H. YAMANISHI, T. UDA, and H. HIRABAYOSHI, Preliminary Design of Tritium Cleanup System for the Large Helical Device, Proc. Int. Tritium Workshop on Present Status and Prospect on Tritium-Material Interaction Studies, July 18-19, 1996, Toyama Japan