

私の算額：海水の重水素で核融合炉を何年運転できるか

平田 久子

筑波大学数理物質科学等技術室

〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

核融合燃料である重水素は地球上に無尽蔵であると一般に述べられている。確かに夥しい量ではあるが地球の重力圏という限られた空間に閉じ込められている限り有限であることには違いない。そこで核融合炉燃料として何年分になるかを推量した。

キーワード：核融合炉、重水素、海水、無尽蔵？

1. はじめに

核融合でエネルギー供給を語る際に燃料の重水素は海水に含まれていて、地球表面の 3 分の 2 は海水だからエネルギー源は無尽蔵にある、と核融合を目差している者は唱えている。この点について且ての指導教員である OUI 東千晶先生に「有限ではないか」と指摘されたことへの回答である。

エネルギー文明が開け、石炭は今迄に百数十年利用され、埋蔵量は向こう 300 年とされている。石油時代は開始から 100 年で間もなく枯渇しようとしている。原子力時代も 40 年前から実用発電が行われ、向こう 70 年でウランは枯渇する。プルサーマル方式導入で再利用しても凡そ同じ桁の期間の猶予しか見込めない。しかし核融合発電に関しては燃料の重水素埋蔵量は 100 年の桁ではないであろう。尤も東日本大震災以来の原子力発電(本稿では誤解を招かぬ為に核分裂炉と記すこともある)への不信感が強まり、核融合発電の実用化はウラン燃料の枯渇までに間に合えばよいという状態ではなくなった。

2. 算額を作るための前提

①基準設定年：ウランが採掘され尽くす頃である西暦 2100 年、または核融合実用発電開始の 2050 年、の何れかとする。重大な要素である人口の予想を考えると 2050 年が現在考える限界であるかもしれない。そこからの向こう年数を計算する。なお現代は 1.8 万年前の第 4 紀氷河時代のヴェルム氷期の後の間氷期であり、氷期は数万年乃至 10 万年周期とされている^[1]。更に太陽系の寿命として 50 億年で地球は太陽に呑み込まれるとされている。

エネルギー需要の目安として、②上記設定年の世界人口を予想する。③ 1 人あたりのエネルギー消費量は世界平均(総エネルギー消費量/総人口)とし、地域分布の格差等は考えない。年齢構成割合も不変とする。現在のエネルギー消費量からの通説の 16.5 % / 10 年の割で①の基準設定年まで増加するものとする。先進国での需要の伸びは抑えるが、開発途上国での消費量の増加は著しいであろう。しかし先進国による省エネルギー努力及び指導の下、極端な増加はこの設定年からはないものとする。④人口の年齢構成分布は世界平均して現在の日本と同

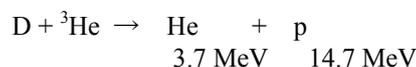
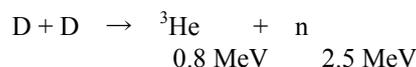
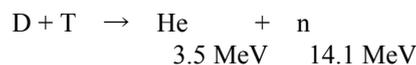
じで、且つ変動がないことにする。これにより民生のエネルギー消費の割合も変わらないとする。⑤地球上の人口分布に対し核融合発電所の設置は均等とし、特別な考慮はしない。送電コスト、損失等は当初の考慮に入れない。電力の供給は殆どが核融合発電で行われるとする。現在も行われている、若しくは将来開発されるであろう自然エネルギー等による発電は地域で行われているが、ここでは考慮しない。

⑥海水中の重水素(以下 D と記すことがある)の存在比は 0.015 % (理科年表)^[1]である。⑦D の海水中で偏在はなく、採掘条件もここでは考えない。⑧全世界海洋体積は、1370323000 立方キロメートル(理科年表)。⑨D はほかに需要がないことにする。リチウム(Li)核融合は燃料埋蔵量が重水素資源 ≫ リチウム資源なのでこれも考慮に入れない。

⑩発電炉の運転効率、稼働率等は現在の原子炉と同等とする。⑪核融合炉の規模、効率は最終的にはタンデムミラー炉で考えたい。

つらつら述べたが、極めて概算である、ということである。また数値の単位は出典のまま記し、随時換算する。

核融合反応は種々の燃料で 10 通り以上の組み合わせがある。T は三重水素、トリチウムである。n は中性子、p は陽子である。核融合反応を起こし易いのは以下の反応であろう。



等々。

D-T 反応に介在し、自身も燃料になりうるリチウムは鉱石や海水からも得られる金属である。埋蔵量は少なくないが、現状で既に他への需要が多く、将来の核融合発電に充分使える量は余り期待できない。ヘリウム 3 は地球上には殆ど存在しない。トリチウムは天然には殆ど安定に存在せず、重水素とトリチウムを反応させ作る。また核融合反応でも作られる。ここでは切実なエネルギー資源輸入国である我が国にとって喜ばしい、豊富な海洋資源から得られる安全・安定な重水素について論じる。

3. 現在の条件・通説で現状の核融合発電を開始させて何年運転できるかの、非常に大まかな計算

100 万キロワットの核融合炉(トカマク炉を前提に語っている)を 1 年間運転するのに要する重水素量はジェネラルアトミックス社の資料で

$$0.6 \text{ t}$$

とされている。(リチウムを用いる核融合で燃料重水素 100 kg という説もある。)また海水 200 リットル中に重水素 6 g が含まれているとされる。前述の 0.6 t を取り出せる海水の量は雑把に

$$20 \times 10^3 \text{ m}^3$$

凡そ 20000 t となる。

ところで、理科年表では地球上の全海水量を

$$1370 \times 10^6 \text{ km}^3$$

と記している。別に理化学辞典^[2]では

$$1.5 \times 10^{21} \text{ kg}$$

とある。これに理科年表の海水の密度: 1.01 ~ 1.05 より換算すると海水量は

$$(1370 \sim 1485) \times 10^6 \text{ km}^3$$

となる。

従ってトカマク 100 万キロワット炉を延何年運転できるかという

$$(6.8 \sim 7.4) \times 10^{13} \text{ 年}$$

となる。

ここで前記②の世界人口を予想する。ウィキペディアによると予想される最も先の人口は 2050 年で、各説あるが凡そ 100 億人とされている。

次に、現在日本の人口当たりの総電力需要は定説で 1 億 2500 万人につき 100 万キロワット炉を 100 基とされているので、目安としてそれに倣い、人口 100 億人に対しては 8000 基必要となる。この量で計算すると

$$85 \sim 93 \text{ 億年}$$

運転できる。

一般に諸説 30 億年から 150 億年といわれている^[3]。次からもう少し順を追って計算してみる。

4. 地球上の重水素の量と核融合燃料として使える量

理化学辞典によると前に述べたように地球上の海水量は $1.5 \times 10^{21} \text{ kg}$ とある。従って殆どが軽水であるとして分子量比から単純にその $2/18$ が海水中の水素の重さとする

$$1.667 \times 10^{20} \text{ kg}$$

となる。その水素量のうち重水素の存在比(個数比)は理科年表によると 0.015% であり、その際の原子量は水素 H の 1 に対し D は 2 であるので全海水中の重水素量は

$$5 \times 10^{16} \text{ kg} = 5 \times 10^{13} \text{ t}$$

となる。

さて、では重水素の個数は、重水素の原子量

$$3.348 \times 10^{27} \text{ kg}$$

から

$$1.5 \times 10^{43} \text{ 個}$$

と導き出せる。

ここでもう一つ考慮しなければいけないのは、核分裂炉における燃料ウランの反応式はウラン 1 個の分裂で如何程のエネルギーが取り出せるか、を基準に計算した。しかし、核融合では 2 個の重水素、または 1 個の重水素から作られる三重水素ともう 1 個の重水素との融合反応で 1 単位のエネルギーを取り出せるのである。即ち核反応の機会が単純に重水素の数の半分となる。従って 7.5×10^{42} 対が核融合を起こす燃料の基準量となる。

また採掘の技術には触れないが、採掘量の目安として地球上に存在する重水素の 50% を可採量とする。

従って、これ以降の考察では重水素原子 7.5×10^{42} 個、 $2.5 \times 10^{13} \text{ t}$ を対象数とする。

5. 100万キロワット発電機の出力と重水素量

核融合発電ではベース電力を担える。従って 100 万 kW 発電機を年間 365 日 24 時間運転することになる。すると 1 基が 1 年間に発生する出力は

$$3.15 \times 10^{16} \text{ J}$$

となる。

さてここで冒頭 2 章に示した D - D 反応を用いる。トリチウムと陽子を得る際の 1 対の反応エネルギーの出力は 4 MeV であった。1 eV は $1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$ であるので 4 MeV は $6.408 \times 10^{-13} \text{ J}$ である。

そこで効率 100% (すべての燃料が反応を起こす) とすると除して

$$5 \times 10^{28} \text{ 対、} 10^{29} \text{ 個}$$

の重水素を 100 万キロワットの発電機の 1 年間の運転に要する。重さでは、前出の D の重さにこの個数を乗じて

$$0.3348 \text{ t}$$

である。

6. 発電機の必要数

核融合発電が実用となるころの世界の人口はウィキペディアによると予想の限界の 2050 年で、諸説あるが 100 億人としている。現在の我が国の総電力需要は人口 1 億 2500 万人に対し、100 万キロワット発電機 100 基分である。この割合を用いて全世界で 8000 基必要となる。

また、同じく前に述べたように電力需要は 16.5% / 10 年の自然増加があるので 2050 年には更にその 1.84 倍(入手資料の 40 年後)となる。

なお現在の日本のエネルギー需要は電力だけでなく、化石燃料の直接燃焼による利用が電力消費の凡そ 4 倍程度ある。直接の燃焼エネルギーは殆ど 100% エネルギーに変換されているが、電力は元の燃料の 30% しか電気エネルギーに変換されていない。従って将来枯渇する燃焼によるエネルギーを全て電力エネルギーで賄おうとすると 1 桁多い電力エネルギーを供給しなければならないことになりかねない。如何せん相当な技術革新を要するので今回のところは現在の電力供給分と同等の量の燃焼エネルギー分を肩代わりすると考える。…ここで電力供給が倍になる。

これらを鑑みると 100 億人に対し核融合発電炉の必要量はフル稼働で

30000 基

といえる^[4]。この値は環状炉の場合のものである。筆者の従事してきたミラー方式改良型、タンデムミラーではエネルギーの取り出しが、熱変換(この変換効率が 30% の低さである)だけの環状型とは異なり、直接変換という効率の高いシステムを活用できる。この直接変換と熱変換を組み合わせることでシステム全体では環状炉の凡そ 2 倍の効率が得られるとすると全世界で

15000 基

と概算する。タンデムミラー炉では今回の課題では関わらないがほかにも実用に向けた大きな利点を持っている。

7. 何年分の燃料となるか

今まで述べてきた 4 章「地球上の重水素の量」を 5 章「100 万キロワットの発電機の…」、6 章「発電機必要数」で除して

環状炉 25 億年、タンデムミラー炉 50 億年

の数が得られた。

8. 結論

2050 年の時点での世界の人口 100 億人に対し、海水から取り出した重水素を燃料として核融合発電を向こう 25 ~ 50 億年運転できる。

少なくとも人類の歴史の範囲、若しくは地球上の次の生命体の歴史で十分核融合発電を賄えるだけの重水素量が海水に含まれている。

謝辞

今回の課題を提起して下さった東千晶先生に謹んで感謝申し上げます。非常に大まかな条件のもとでの考察につき、改めてご指摘いただき少しずつ詰めていきたいと思えます。

参考文献

- [1] 理科年表, 丸善.
- [2] 理化学辞典, 岩波書店.
- [3] 井上信行, ほか, トコトンやさしい核融合エネルギーの本, 日刊工業新聞社.
- [4] 平田久子, 核融合発電実用時の我が国の電力需給の考察, 技術報告 No. 26 (2006) 91.

How long term for fusion reactor operation by use deuterium in the sea

Hisako Hirata

Technical Service Office for Pure and Applied Science, University of Tsukuba,
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8577 Japan

Keywords: Fusion Reactor, Deuterium, Seawater, Limitless?