95. レーザー核融合概念炉「千里Ⅰ号」の トリチウムサイクルに対するモデル解析

乗松 孝好*, 井門 俊治*, 中井 貞雄*, 山中 千代衛*

(1981年 9月30日 受理)

(1982年 3月23日 再受理)

Model Analysis for Tritium Cycle of Laser Fusion Reactor Concept "SENRI-I"

By Takayoshi NORIMATSU, Shunji IDO,
Sadao NAKAI and Chiyo YAMANAKA

Model calculations for a tritium cycle in a conceptual laser fusion reactor "SENRI-I" were carried out. Time behaviors of tritium concentration in liquid lithium coolant and of amount of tritium in a target factory were analyzed for parameters of tritium breeding ratio and of tritium critical concentration ρ_c . Tritium in lithium can be recovered for tritium concentration higher than ρ_c . When value of ρ_c is assumed to be 10 atomic ppm, the tritium concentration becomes that of ρ_c in a few days after start up and approaches to 10.7 appm in the equilibrium state. The initial inventory and doubling time of "SENRI-I" are determined mainly by the critical concentration ρ_c and breeding ratio of tritium, respectively. The initial inventory of "SENRI-I" is 1.3×10^7 Ci and this amount is produced in a month after start up.

KEYWORDS: laser fusion reactor SENRI-I, model analysis, tritium cycle, tritium concentration, tritium inventory, time dependence, tritium, breeding ratio

1. はじめに

レーザー核融合炉の設計において、システム中でのトリチウム濃度、システム全体でのトリチウム取扱い量等の決定は、炉全体および関連施設の設計に重要である。本報は、レーザー核融合炉「千里Ⅰ号」⁽¹⁾⁽²⁾での核設計データをもとに、Li中のトリチウム濃度およびシステム全体でのトリチウム量について検討した結果をまとめたものである。

核融合炉では核分裂炉に比べて第1壁の中性子等の負荷が大きく、第1壁保護のためにいろいろな炉構造が提案されている。大阪大学では球型のステンレス鋼容器内壁を磁場でガイドした天然 Li を流下させる方法を提案している。厚さ64 cmのLiを流下させることにより、荷電粒子、X線、 γ 線のみならず中性子による第1壁の照射損傷が少なくなり、機械的・熱的衝撃が緩和されて炉寿命を30年程度に設定できる。また中性子によるトリチウム燃料の高効率増殖が可能になる。磁場を用いることにより、Li流速を制御してLi層の厚さをほぼ均一にする。「千里Ⅰ号」の主要な諸元はTable 1

Table 1 Parameters of laser fusion reactor concept "SENRI-I"

Laser	Gas phase (CO ₂ etc.)	
	Number of beam	8
	Output energy	1~5 MJ
	Shot cycle	1 Hz
	Peak power density	200 TW
	Pulse duration	100 ns
	Efficiency	10%
Pellet	Multi-shell	
	Fuel	DT
	Radius	3 mm
Output power		1,240 MW (Thermal) 426 MW (Net electric)
Reactor vessel with magnetically guided inner Li flow		
	SUS container	R=5.64m
	Cavity	R=5m
	Thickness of Li flow	0.64m T=400°C (Inlet) 580°C (Outlet)

* 大阪大学レーザー核融合研究センター(Inst. of Laser Eng., Osaka Univ.)

にまとめてある。表中、熱出力1,240 MWがペレット中のDTの燃焼による出力1,000 MWより多いのは、ブランケットゲイン、すなわちブランケット中の ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ 反応などによるゲインがあるためである。トリチウム増殖率は、1次元中性子輸送コードANISN-JR⁽³⁾および核データGICX-40⁽⁴⁾による計算によって求められたもので、ペレットの爆縮状態を示す $\rho R=3\sim 6\text{ g/cm}^2$ の値に対してそれぞれ $\eta=1.58\sim 1.64$ の値を示す。 η を大きく変えるためには、LiPbの添加やLiの同位体比を変えて行く。

炉上部から1s間に1個の割合で投入された燃料ペレットはMJ級レーザーで爆縮される。このペレット1個中には数10 Ciのトリチウムが含まれている。燃料の一部はDT反応で中性子と ${}^4\text{He}$ となるが、残りは未反応のまま各ポートから真空ポンプで排気されるか、

またはLi層に吸着されてLiサイクルに入る。一方、Li層ブランケットでは核反応で生成した中性子とLiとの間で ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$, ${}^7\text{Li}(n, n'\alpha)\text{T}$ 反応でトリチウムが新たに作られる(トリチウム増殖)。これらのトリチウムがLi中でどのような化学形で存在するかは、ここではふれないことにする。Liは熱交換器を通ったあと炉に還流されるが、一部はトリチウム回収装置に分流されてトリチウムが分離される。排気ガス中のトリチウムはすべて回収され、いずれもターゲット工場へ送られるものとする。これらのトリチウムサイクルはFig. 1にまとめられる。なお、ターゲット工場を運転するために必要なトリチウムおよび回収したトリチウムがターゲットとなるまでの時間的遅れによって生じるトリチウム取扱い量の増加は無視した。

Fig. 1 Tritium cycle of laser fusion reactor concept "SENRI-I"

II. Li 中のトリチウム濃度

レーザー核融合発電システム運転開始後のLi中のトリチウム濃度の変化について計算してみる。

全Liの量を m とし、Li中のトリチウム濃度を ρ_t とすると、 ρ_t は

$$m \frac{d\rho_t}{dt} = (\eta a + b)J - QA[\rho_t - \rho_e] - \lambda \rho_t m \quad (1)$$

$$\begin{aligned} [\rho_t - \rho_e] &= 0 & \text{if } \rho_t - \rho_e \leq 0 \\ &= \rho_t - \rho_e & \rho_t - \rho_e > 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$aJ = \text{const.}$$

$$(3)$$

で表わすことができる。ただし、Li循環は充分頻繁でトリチウム濃度はLiサイクル中で場所によらず一定とする。用いた文字の意味および「千里 I 号」における典型的な値をTable 2に示す。(1)式の右辺第1項はペレット投入に対応するLi中のトリチウム増加分で、未反応吸着によるもの(bJ)と中性子によるトリチウム増殖分(ηaJ)を含んでいる。第2項は回収装置、第3項は崩壊による減少である。トリチウム回収装置は、ある回収限界濃度 ρ_e を越えるトリチウムに対して $A=$

Table 2 Typical value of laser fusion reactor "SENRI-I"

Tritium concentration in Li	ρ_i	(Ci/kg)
Tritium inventory	M_i	(Ci)
Tritium breeding ratio	η	1.6
Fractional burn up	a	0.5
Absorbed tritium in Li/Injected tritium	b	0.49
Vacuum pumped tritium/Injected tritium	c	0.01
Tritium recovery rate from Li flow	A	9×10^{-3}
Critical concentration of tritium recovering	ρ_c	10 atomic ppm (appm) (41.8 Ci/kg)
Li flow rate	Q	1.6×10^3 kg/s
Tritium flow due to pellet injection	J	34.4 Ci/s
Mass of Li	m	4×10^5 kg

$\alpha\eta_r$ (α : 分流量, η_r : 回収効率) の効率で回収できるものと仮定している。「千里 I 号」では 1% を分流して回収限界濃度を越えるトリチウムを 90% 回収できるものとした。したがって, Li 流からのトリチウム回収率 A を同じとすれば, 回収効率が 50% のとき分流量は 1.8% でなければならない。対象とする現象がトリチウムの半減期より充分短くまた増殖率が大い場合, 第 3 項は無視できる。また (3) 式は一定の核融合出力に対応するトリチウム消費率が一定であることを示し, $aJ = 17.2$ Ci/s となる。

この方程式の解は

$\rho_i \leq \rho_c$ のとき

$$\rho_i = \frac{(\eta a + b)J}{\lambda m} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (4)$$

$\rho_i > \rho_c$ のとき

$$\rho_i = \rho_c \{ \alpha - (\alpha - 1)e^{-\lambda'(t - t_c')} \} \quad (5)$$

ここで, $\lambda' = \lambda + 1/t_1$

$$\alpha = (1/\lambda')(1/t_c + 1/t_1)$$

$$t_c = \rho_c m / (\eta a + b) J$$

$$t_c' = -(1/\lambda) \ln(1 - \lambda t_c)$$

$$t_1 = m / AQ$$

とする。 t_c' は炉の運転開始からトリチウム回収装置が作動し始めるまでの時間であり, t_1 はすべての Li がトリチウム回収装置を通過するまでの時間に相当する。

ここで, Table 2 の値を用いると,

$$t_c \approx t_c' = 4.4 \text{ d} \quad (6)$$

$$t_1 = 7.7 \text{ h} \quad (7)$$

となり, トリチウムの半減期に対して充分短いことがわかり, $\lambda' \approx 1/t_1$ となる。 ρ_c の時間変化を Fig. 2 に示す。運転開始後 t_c' で回収装置が働き出して急速に平衡値 ρ_∞ に到達する。回収装置が働き出してから平衡になるまでの時間が短いのは, Li の流量が多く短時間に

すべての Li を浄化してしまうためである。

$$\text{ここで, } \rho_\infty = \frac{(\eta a + b)J + \rho_c QA}{m\lambda + AQ} \quad (8)$$

であり, 「千里 I 号」の場合

$$\frac{\lambda m}{AQ} = 4.9 \times 10^{-3} \ll 1 \quad (9)$$

$$\text{なので, } \rho_\infty = \rho_c + \frac{(\eta a + b)J}{AQ} \quad (10)$$

となる。

Fig. 2 Time dependence of tritium concentration in Li

トリチウムの炉外への拡散を少なくするという見地に立った場合, Table 2 の値を用いると, $(\eta a + b)J / AQ = 3$ Ci/kg (0.7 appm) なので, $\rho_c > 10$ appm のとき $\rho_\infty = \rho_c$ であることから, トリチウム回収効率を高めるより, 回収限界濃度を低くする方が重要であることがわかる。

一方, $\rho_c < 0.1$ appm のときは $\rho_\infty = (\eta a + b)J / QA$ となり, 回収効率の方を高める努力が必要になってくる。この関係を Fig. 3 に示す。

Fig. 3 Relation between critical concentration of tritium recovery and tritium concentration in Li on equilibrium state

Ⅲ. ターゲット工場におけるトリチウム収支

Li中のトリチウムおよび排気中のトリチウムは回収されたターゲット工場に集められる。ここでのトリチウムの量 M_t の時間的变化を求めてみると、

$$\frac{dM_t}{dt} = -(a+b)J + QA[\rho_t - \rho_c] - \lambda M_t \quad (11)$$

第1項はベレット投入によるトリチウム流量 J のうち、核燃焼による消費量 aJ と Li への吸収分 bJ の和

である。第2項は Li 中から回収されるトリチウムであり、第3項はトリチウムの核壊変による損失である。 ρ_t には(1)式の解を用いる。解は

$\rho_t \leq \rho_c$ のとき

$$M_t = M_0 \cdot e^{-\lambda t} - \frac{(a+b)J}{\lambda} \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \quad (12)$$

$\rho_t > \rho_c$ のとき

$$\begin{aligned} M_t = & \frac{1}{\lambda} \{ -(a+b)J \\ & + QA\rho_c(\alpha-1) \} \\ & + \frac{QA\rho_c(\alpha-1)}{\lambda' - \lambda} e^{-\lambda'(t-t_c)} \\ & + \{ M_0 - QA\rho_c(\alpha-1) \\ & \cdot (t_1 + 1/\lambda) e^{\lambda t_1} \\ & + (a+b)J/\lambda \} e^{-\lambda t} \quad (13) \end{aligned}$$

で与えられる。

「千里 I 号」の例によってターゲット工場におけるトリチウム量の時間的变化を計算すると Fig. 4 のようになる。この計算では運転開始時のトリチウムインベントリー M_0 を 5×10^7 Ci とした。実線はトリチウムの崩壊を考慮した場合 ($\lambda = 1.78 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$) であり、破線は $\lambda = 0$ とした場合である。発電所の運転が開始されると工場の手持量は最初減少するが、トリチウムの回収

Broken lines show the dependences when decay of tritium is neglected.

Fig. 4 Time dependences of tritium in target factory

が始まり燃料ペレットとして消費を上回るとき増加に転じる。やがてトリチウム量の増加はトリチウムの崩壊と平衡する。トリチウムの増加は12年で平衡値の70%になり, 100年でほぼ平衡値となる。平衡値を M_∞ とすると, (12)式において $M_\infty = M_i(t \rightarrow \infty)$ より,

$$M_\infty = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{QA}{QA + \lambda m} \{ (\eta a + b)J - \lambda m \rho_e \} - (a + b)J \right] \quad (14)$$

となる。さらに, (9)式の関係を用いるならば, より簡便化され

$$M_\infty = \frac{(\eta - 1)aJ}{\lambda} - m\rho_e \quad (15)$$

$$\approx \frac{(\eta - 1)aJ}{\lambda} \quad (\rho_e \ll 100 \text{ ppm}) \quad (16)$$

のようになり, 熱出力と増殖率にだけ依存する。「千里1号」の場合, 炉寿命は30年として設計されているため, 平衡状態にまで達することはない。しかしながら, 同クラスの発電所が継続的に運転される場合 $M_\infty = 6 \times 10^6$ Ci であり, これは常温常圧ガス(T_2)では 2×10^3 m³, トリチウム水(T_2O)では2 t程度に相当し, 保管または消費対策が必要となる。

IV. 初期装荷量と倍增時間

トリチウム生産の収支が正に転じ始めるまでの炉の

The solid lines show the dependences when $M_0 = 5 \times 10^7$ Ci and the broken line shows the dependence when $M_0 = 5 \times 10^8$ Ci.

Fig. 5 Tritium breeding ratio to initial inventory is shown using three critical concentrations of tritium recovery.

運転に必要とされるトリチウム量を初期装荷量 M_i とすると,

$$M_i = M_0 - \min \{ M_i \} \quad (17)$$

で表わすことができる。ここで, M_0 は運転開始時のターゲット工場におけるトリチウム量である。(13)式より, $dM_i/dt = 0$ となる時間 t_{min} を求めてみると,

$$t_{min} = \frac{1}{\lambda' - \lambda} \left[\lambda' t_c' - \ln \left\{ -(\lambda' - \lambda) \left\{ M_0 + \frac{(a+b)J}{\lambda} - QA\rho_e(\alpha - 1)e^{\lambda' t_c'} \left(t_1 + \frac{1}{\lambda} \right) \right\} / \lambda' QA\rho_e(\alpha - 1) \right\} \right] \quad (18)$$

となる。Table 2 の値を用い, さらに $M_0 = 5 \times 10^7$ Ci とすると, (18), (13), (17)式より $M_i = 1.3 \times 10^7$ Ci となる。Fig. 5 に, $M_0 = 5 \times 10^7$ Ci とした場合の初期装荷量とトリチウム増殖率との関係を, 回収限界濃度をパラメータとして表示した。また, $\rho_e = 10$ appm, $M_0 = 5 \times 10^8$ Ci とし, 初期量が10倍の時の値を破線で示した。回収限界濃度が高い場合, トリチウム増殖率の初期装荷量への影響は少なくなる。Fig. 6 に, $M_0 = 5 \times 10^7$ Ci とした場合の初期装荷量と燃焼率との関係を示す。また, $\rho_e = 10$ appm, $M_0 = 5 \times 10^8$ Ci とした場合の関係を破線で示した。

Fig. 7 に, $M_0 = 5 \times 10^7$ Ci とした場合のトリチウム回収限界濃度と初期装荷量との関係を実線で示す。「千

The solid lines and the broken lines show the dependences when $M_0 = 5 \times 10^7$ Ci and 5×10^8 Ci, respectively.

Fig. 6 Tritium burn ratio to initial inventory

里 I 号」のように、運転開始時のトリチウム崩壊量が増殖量より充分小さく、 $t_{\min}$ がトリチウムの半減期に比べて充分短いとき、 $\lambda=0$ と置くことにより初期装荷量の特性をより明確にすることができる。(1), (11) 式で $\lambda=0$ と置き同様の手順で求めると、

$$M_I = \frac{a+b}{\eta a+b} m \rho_e + \left\{ a+b+(\eta-1)a \cdot \frac{\ln(\eta-1)a}{a+b} \right\} \frac{mJ}{AQ} \quad (19)$$

で表わすことができる。この式より求めた初期装荷量と回収限界濃度との関係を Fig. 7 に破線で示す。図からわかるように「千里 I 号」の場合、初期装荷量の増殖率に対する依存性は小さく、回収限界濃度が 0.1 appm 以下ではベレットインジェクション量とトリチウム回収能力((19)式第 2 項)により決まり一定となる。

ターゲット工場におけるトリチウム量は、回収により増加しやがて初期値を越えてトリチウムの生産へと移行する。運転を開始して初期装荷量分だけトリチウムを生産するまでの時間を倍増時間 (doubling time) t_D とする。すなわち、

$$M_{ID} = M_0 + M_I \quad (20)$$

である。運転開始時のトリチウムの値 M_0 を 5×10^7 Ci とした場合の倍増時間と増殖率との関係を Fig. 8 に示す。「千里 I 号」の場合、Table 2 の値を用いると、初期装荷量は運転開始後 36 日で生産される。Fig. 8 で破線は M_0 を 5×10^8 Ci とした場合で、倍増時間が短い間は M_0 の影響は比較的少ない。

V. 結 論

レーザー核融合炉システム「千里 I 号」のトリチウムサイクルにモデル解析を適用した結果、次の事項が明らかになった。

- (1) Li 中のトリチウム濃度は数日の間に平衡値 ($\rho_e + (\eta a + b)J/QA$) に達し、その値は「千里 I 号」の場合 10.7 appm (43 Ci/kg) である。
- (2) 「千里 I 号」の初期装荷量は 1.3×10^7 Ci であり、この量は運転開始後はほぼ 1 ヶ月で生産され、炉寿命の 30 年の間に 5×10^8 Ci のトリチウムが生産される。

Broken lines are given by Eq. (19).

Fig. 7 Critical concentration of tritium recovery from Li to initial inventory

The broken line shows the dependence when $\rho_c = 10$ appm and $M_0 = 5 \times 10^8$ Ci.

Fig. 8 Tritium breeding ratio to doubling time is shown using three critical concentrations of tritium recovery for $M_0 = 5 \times 10^7$ Ci

- (3) 「千里 I 号」の Li 中のトリチウム濃度および初期装荷量はトリチウム回収限界濃度 ρ_e が 10 appm 以

上では主として ρ_e に、0.1 appm以下ではベレットインジェクション量とトリチウム回収能力との比によって決まる。

本報では、ターゲット工場で製作に必要なトリチウムおよびベレットの備蓄については評価をしなかったが、1日の備蓄を持つとすると 3.7×10^6 Ci のトリチウムが必要となり、さらに精度の良い評価を行うためにはターゲット製作過程および備蓄も含めた研究が必要であろう。

—参考文献—

- (1) 阪大レーザー核融合研究センター 慣性核融合炉研究委員

会編：慣性核融合炉設計検討報告書，(1979)。

- (2) IDO, S., IMASAKI, K., IZAWA, Y., KATO, Y., KITA, GAWA, Y., MATOBA, M., MIMA, K., MOCHIZUKI, T., NAKAI, S., NISHIMURA, H., NISHIHARA, K., NORIMATSU, T., SASAKI, T., YABE, T., YAMANAKA, T., YAMANAKA, C.: 8th Int. Conf. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Bruxelles, July, 1~10 (1980); *ILE* 8009P, (1980).
- (3) KOYAMA, K., *et al.*: ANISN-JR, A one-dimensional discrete ordinates code for neutron and gamma-ray transport calculations, *JAERI-M* 6954, (1977).
- (4) SEKI, Y., IIDA, H.: Coupled 42-group neutron and 21-group gamma ray cross section sets for fusion reactor calculations, *JAERI-M* 8818, (1980).

好評発売中

高耐火性酸化物セラミックス

ボルボリノフ他著 モスクワ化学工業大学で多数の専門家が独自の研究開発結果をまとめ、約500件におよぶ最近の内外研究論文を整理引用して編纂した本分野初の本格的モノグラフ。

①酸化物セラミックスの製造技術の基礎とその一般的性質 ②単一酸化物を基とする焼結セラミックス ③若干の酸化物二元化合物を基とする焼結セラミックス ④粒状構造の酸化物耐火物 ⑤酸化物多孔質セラミックス ⑥酸化物の糸状結晶と多結晶繊維。

■B5判、約300頁/定価18,000円

データ 高融点化合物便覧

サムソノフ他著 酸化物以外の最も普遍的かつ有望な高融点化合物(ほう化物、炭化物、窒化物、けい化物、りん化物、硫化物、アルミニウム化合物、バリウム化合物)の結晶化学的、熱的、熱力学的、電気的、磁気的、光学的、機械的、化学的性質および耐火性に関するデータの総まとめ。

■B5判、554頁/定価16,000円

原子炉材料の腐食

ゲラシーモフ著 原子炉発電所の安全操業課題の解決には原発設備の金属の効果的な防食システムの確立が必要であり、そのためには金属と冷却材の相互作用下で起るプロセスの物理法則や腐食におよぼす照射の影響などを知らねばならない。

本書はこの問題の根本的解決を目指した貴重な最新研究データの総括である。

■B5判、256頁/定価26,000円

データブック 無機化合物の分子定数

クラスノフ他著 3500以上の無機化合物の分子定数—分子の核間隔、標準振動周波数、生成熱、解離エネルギーを数表にまとめ、それらの適用条件と引用文献の一覧表を付した気体の熱力学的および熱物理的性質と化学平衡の計算のための最新データ集。

■B5判、約450頁/定価13,000円

無機ふっ化物の主要性質便覧	定価18,000円(送料300円)
超高融点材料便覧	定価17,500円(送料300円)
超高融点金属の高温腐食と防食	定価19,000円(送料300円)
超伝導材料(新材料探究と技術開発)	定価19,000円(送料共)
半導体系の固溶体	定価19,000円(送料共)
ステンレス鋼の腐食(米原書)	定価15,800円(送料共)
元素の物理的性質	定価14,000円(送料300円)
最新酸化物便覧	定価12,000円(送料300円)
酸化物の熱物理的性質	定価 9,500円(送料250円)
金属の合金と高温酸化	定価15,000円(送料300円)
金属酸化物の還元過程の熱力学	定価12,000円(送料300円)
気体と液体の熱物理的性質	定価17,000円(送料350円)
低温度における材料の熱物理的性質	定価12,000円(送料250円)
硫化物便覧(物性と状態図)	定価12,000円(送料300円)
複合材料の構造と性質	定価15,000円(送料300円)
プラズマ溶射法	定価14,000円(送料300円)
高融点被覆	定価16,000円(送料300円)
耐熱無機被覆の化学と処理技術	定価15,000円(送料250円)
腐食抑制剤	定価18,000円(送料300円)