

原子炉遮蔽体の最適化問題

その1 最適化の数学的手法と物理的モデル

金井 康二* 伊藤 泰義*

The Optimization Problems on the Reactor Shields Part 1 Optimization Techniques and Models

by

Yasuji KANAI and Yasuyoshi ITO

Abstract

This paper is a review of the recent works on the reactor shield optimization in various countries such as Japan, the United States, the Soviet Union, the United Kingdom and the Federal Republic of Germany. Most of the works including our original studies were presented at the two international meetings on the problems of reactor shielding which were held in Paris, France in 1970 and 1972.

All these works have recourse to either of linear programming, gradient method, dynamic programming and so on as optimization techniques. Thus, explanation is given for these techniques.

In the present stage of the shielding optimization studies, there is a room for improving accuracy of calculation model used to describe the complicated nature of the attenuation process and the complex coupling of the important shielding characteristics in various materials.

The main purpose of this report is to make clear the limitation of applicability of the computer programs from the viewpoint of the optimization techniques and used models. Discussions are given in chapters 5 and 6 on the advantages and disadvantages of these optimizing procedures currently used in optimum shielding calculations.

目次

第1章	はしがき
第2章	問題の起こり
第3章	問題の背景(最適化の手法)
第4章	問題の特色
4. 1	最適化の条件
4. 2	放射線減衰計算
4. 3	最適化のモデル
4. 3. 1	モデルの検討
第5章	問題の解法(その1)
5. 1	変分法による方法
5. 2	線形計画法による方法
5. 3	傾斜法による方法
第6章	問題の解法(その2)
6. 1	ポントリヤギンの最大原理による方法

6. 2	動的計画法による方法
第7章	各国における最適遮蔽研究の動向
第8章	おわりに
	参考文献

1. はしがき

特に条件の厳しい船舶用あるいは宇宙飛翔体用原子炉遮蔽の設計には最適計算をおこない、できるだけ軽量・小形化することが要請される。人員や機器の安全性を保障し、かつ、経済的効率を増大させるような遮蔽体の最適化問題は一般には炉形状・遮蔽形状・遮蔽材・多重層構成の場合の物質配列および各層の厚さなどに伴う放射線挙動の変化、線量・熱発生・放射線損傷およびその他の工学的制約による複雑な条件に依存

* 原子力船部 原稿受付：昭和48年5月29日

する。

遮蔽最適化の理論的研究として1948年 L. Tonks & H. Hurwitz による研究¹⁾ が発表されて以来、特に宇宙飛翔体用原子炉の分野で、遮蔽重量最小化問題として活発に研究が展開されてきた。

当初は物理的モデルを単純化し、取り扱われた最適化の手法も古典的なものであった。しかし、ここ数年前から放射線減衰の現象を最新の理論を使って、より厳密に評価されるようになってきた。

適用される最適化の数学的手法も、特に制御関係の分野で開発されるに従ってシンプレックス法、傾斜法、動的計画法、さらにはポントリヤーゴンの最大原理などが適用されるようになってきた。

放射線減衰過程のより厳密な取り扱いにより、求められる最適な遮蔽体に対する信頼性が増し、各種最適化の数学的手法の応用によって重量軽減化問題だけでなく空間的スペースの減少化、コストの節減化あるいは耐熱発生・放射線損傷などの問題が取り扱えるようになった。このような理論的研究の進歩とは対称的に、各国とも実験的研究は数少ない。わが国ではわずかに当所でおこなわれた多重層遮蔽体の最適配置に関する研究²⁾ があるに過ぎない。

各国における最適遮蔽に関する理論的研究をまとめたものとしては、H. Schultz & S. Sasse の "Analytical Estimates for an Optimum Choice and Configuration of Materials in Reactor Shields"³⁾ があり、1965年までの文献が紹介されている。

その後、特にわが国でおこなわれた研究の紹介が、第8回原子力総合シンポジウム(1970年)で「原子力船の遮蔽」⁴⁾ の観点から片岡により発表された。それ以後、最適遮蔽に関する研究のサーベイはおこなわれていない。そこで、ここでは特に1970年および1972年に同じパリで開催された2つの「遮蔽に関する国際会議」で発表された各国の研究を中心として、著者らが1969年より手がけてきた研究のうち、上述した会議に未発表のものも含めて、特に開発された計算コードに焦点をあててこの分野での各国の研究の現状について述べる。

本報告の目的の1つは、各研究で適用された最適化の数学的手法と仮定された物理的モデルとの関係を検討し、適用範囲を明確にすることである。

本報告の構成は第2章では遮蔽体の最適化問題が起こった起源をさぐり、第3章では最適化を進める際の数学的手法について検討をおこない、第4章では遮蔽体の最適化の定義を考察し問題の特色を明らかにし、

第5章では最適化の手法別に、各研究の概要を紹介し、かつ問題点を指摘し、第6章では著者らの研究を紹介する。第7章ではこの分野における各国の現状と今後の研究の進め方を取り上げる。

2. 問題の起こり

船用、宇宙飛翔体用原子炉のような推進型のプラントでは、原子力発電炉のような固定型のプラントに比較して重量・容積等がコスト以外にも重要視される。原子力船が従来船と競合する場合、従来船では遮蔽を必要としないため、遮蔽重量・遮蔽設置による容積・資本費等の増大は負の因子になる。また、宇宙飛翔体の場合には、遮蔽重量が全重量の半分以上もしめることになり得るため、遮蔽の性能が、直接かつ重大に系全体の性能に反映する。

固定型の原子力発電プラントの場合でも、遮蔽が他の機器に及ぼす影響例として、放射線損傷・熱発生を減らすための熱遮蔽が、圧力容器の寸法を定める一因となることがあげられる。

一方、安全性の面から遮蔽を考えると、部分的に遮蔽層を厚くした場合、後の計算例で指摘するごとく、むしろ危険側の数値を与えることも多々ある。

それゆえ、遮蔽設計では、対象とする原子力プラントの型に従い、"効率良い" 遮蔽体を設計するための知識が要求される。

目的にかなう遮蔽体の構成—遮蔽材および遮蔽構造(形状・配列・厚さ)の決定—を確立するために、実験により整理されたデータあるいは手軽で、要求する精度内で求められる計算方式が遮蔽設計者などにより要望されていた。

3. 問題の背景(最適化の手法)

最適な遮蔽体(第4章で検討する)を求める方法として次の2つが考えられる。

(i) 条件を変化させて計算あるいは測定をおこない、それらデータから得られる性質から最適状態を推定するパラメータ・サーベイの方法。

(ii) 最適化の数学的手法に合致するようなモデルを組み立て、決定論的に求める方法。

実験による方法は(i)に相当する。(i)の方法による特殊な例として、わが国でおこなわれたものは原子力第1船「むつ」の遮蔽設計に関連して、熱遮蔽の鉄板の厚さに関する最適化の研究があげられる⁵⁾。また、川重田中等によって、原子力プラント(PWR)との関連において、鉄—水混合の1次遮蔽体重量、鉛

一層の2次遮蔽体重量と原子炉出力との関係が、プラントの配置という観点から検討され、様々な興味ある結果が得られた⁷⁾。

さらに、東北大学の300MeV電子線型加速器施設の遮蔽設計にたずさわった岡島は粒子加速器からのビーム条件による遮蔽材料の配置を施工の面から最適化の検討をおこなっている⁹⁾。(ii)の方法は、最近になって特に制御の分野で開発された最適化の手法を適用し、遮蔽設計に直接利用できるように計算コード化が進められている。最適遮蔽の分野で用いられた手法は、

- ① 変分法
- ② 線形計画法 (LP)
- ③ 傾斜法
- ④ 動的計画法 (DP)
- ⑤ ポントリヤギンの最大原理 (MP)

などがある。以下それらの概要を述べる。

①の変分法は汎関数の極大・極小を求める方法で、ラグランジュ (Lagrange) の未定係数を導入して、いわゆる評価関数と束縛条件 (第4章参照) を結合し最適状態から微小変化した状態に対する評価関数の変化が一定の符号を持つという条件より Euler-Lagrange

の方程式を導いている。しかしながら取り扱う関数の性質によっては、古典変分法では最適解が求められない。

②の線形計画法 (Linear Programming) は原則的には線形の関係式であらわされた条件式をシンプレックス (Simplex) 法で最適解を探索する方法である。

③の傾斜法 (gradient method) は steepest descent あるいは ascent 法ともよばれ、最初に仮定された出発点の近傍を探索して評価関数の減少 (最小化問題の場合) する方向を見出しこれを第2の出発点とし、繰り返し法によって最適点に到着させる方法である。

収束速度を上げることを目的として、共役傾斜法 (conjugate gradient method) などが開発された。

④の動的計画法 (Dynamic Programming method) では多段決定過程を考え、最適性の原理を用いることにより最適政策に関する漸化式を導き、繰り返しにより順次各段階での最適解を求める。パラメータ・サーベイによる方法に比べ計算量を大幅に減少でき、離散的要因を含む最適問題にも活用できる。欠点としては変数、決定段階が増加すると必要な計算記憶容量、計算時間が急激に増加する。この欠点を解決するため、

Table 1 Optimization techniques and penetration calculations
for various shield optimization codes

authors	program name	optimization technique	penetration calculation	
Enginol ¹⁶⁾	SHOP	variation	exp ^{a)}	/ RESTRAB ^{b)}
Engle jr. ¹⁹⁾	ASOP	variation	ANISN	/
* ²⁰⁾	McMIN	LP	/ McBEND
Bernick ²⁴⁾	OPEX	gradient	exp	/
Lahti ²⁶⁾	OPEX-2	gradient	exp	/
中山, 金井 ^ら ²⁷⁾	OPEX-3	gradient	exp	/
中山, 金井 ^ら ²⁷⁾	OPEX-N	conjugate gradient	exp	/
中山, 金井 ^ら ²⁷⁾	OPERA	conjugate gradient	exp	/ RAC
Generozov ^{30,31)}	*	gradient	Monte Carlo	/ Monte Carlo
金井, 片岡 ^{36,37)}	SOP-DP	DP	linear diff.	/
金井, 伊藤 ^{40,41)}	SOLA series	DDP	linear diff.	/
Klumpp ⁴⁷⁾	DYNOPT	DP	*	/ DOT-II

ABREVIATION LP for linear programming
DP for dynamic programming
DDP for differential dynamic programming
exp for exponential
diff for differential

..... nothing, * unknown

a) utilized for optimizing stage

b) utilized for determining the parameters

ベルマンの最適性原理の関係を偏微分して、ポントリヤギンの最大原理に相当する関係式を導き出したのが微分ダイナミック・プログラミング(differential dynamic programming method)である。

⑤の最大原理は古典変分法の欠点を除き関数の性質に対する制限をとりはらったものである。最適解の特徴を明らかにし、物理的意味を理解するに適している反面、数値計算化するには容易でないという欠点をもつ。Table-1 に適用された最適化の手法をかかげる。

以上、最適遮蔽問題に適用された最適化手法を簡単に紹介したが、詳細な内容は各手法に関する文献⁹⁾あるいは原子力関係の分野における各種の最適問題を取り上げ、最適化の手法に関する文献表も完備している報告集¹⁰⁾を参照されたい。

4. 問題の特色

4.1 最適化の条件

研究分野の輪廓を明確にするため、最適化の定義をかかげる。文献11)で F. W. Krüger は「遮蔽体を建造する際、最小の経済的投資で、目的の機能を満足させることが遮蔽体最適化の条件である。対象とするコストは直接の遮蔽体建造費だけでなく、空間的な条件、重量の変化、遮蔽材料の選択、その他工学的理由や条件などによる遮蔽体を変えた場合に起因する費用も考慮しなければならない。」と述べている。

さらに、「原子力船の遮蔽」という観点から、特に最適化を目標とする評価関数について第8回原子力総合シンポジウムの講演で片岡は「遮蔽の資本費、遮蔽重量、遮蔽体の外形寸法(長さ、幅、高さ)を変数とする遮蔽体設置による損失関数 U と、線量・放射化を変数とする遮蔽体設置による人員・機器の安全性という面からの利益関数 V との差 $U-V$ を最小にするのが遮蔽体の最適化であるが、与えられた設計基準線量率に近い条件で設計する場合では V の変動は少ない。したがって、 V を固定した条件のもとで U を最適化の評価関数として使っても、一般には大差がない¹²⁾。」と述べ、その評価関数 U は各変数の線形結合であらわすことを提案している。

田中は実際の遮蔽設計で要求する最適化の条件を、特に原子炉型式と遮蔽という観点から考察を加えている¹⁰⁾。

以下、遮蔽体の最適化問題をモデル化するに際して、取り扱われる評価関数と決定すべき遮蔽体のパラメータおよび制約条件を検討する。

評価関数：宇宙飛翔体では重量が最優先されて評価

されるのに対し、陸上施設では遮蔽体の資本費が問題にされる。一方、船舶の場合には重量、資本費、外径寸法それぞれが無視できない。取り扱いが簡単なことにも起因して、当初以来、重量のみを評価関数とした研究が多かった。しかしながら研究が進むにつれて、重量以外の評価関数も取り扱う研究が現れてきた。W. B. Terry & H. Fenech は傾斜法を応用して船用炉の1、2次遮蔽を重量と資本費の線形結合で表現した評価関数に関し、船種別に興味ある結果を導いている¹³⁾。

著者らが開発したSOLAコードでは重量・資本費・外径寸法を線形結合で表現した評価関数が取り扱える。

また、線量のほかに熱発生損傷の問題が扱えるように放射線束の関数項も付け加え一般化をはかった。

Table-2 a に現在、使用可能な最適遮蔽計算コードで考慮される評価関数を一覧表にまとめた。

最適化のパラメータと制約条件：上述のような評価関数のもとで決定すべき遮蔽体のパラメータは、(1)遮蔽材料(物質、混合比)、(2)形状、多重量を構成する場合にはさらに(3)配列、(4)各層の厚さなどがある。(以下これらを最適化のパラメータと呼ぶ)

これらの最適化のパラメータを決定するには核的、熱的、構造的な条件を考慮しなければならない。核的条件としては放射線の減衰特性のほかに、耐放射線(損傷、熱発生)の問題、熱的条件は遮蔽材の耐熱性の問題、構造的条件としては加工性、強度の問題がある。さらに設計の立場からは原子力プラント、施設全体との関連した条件も検討すべきものである。

Table-2 b, c に最適化のパラメータと制約条件とをかかげた。

4.2 放射線減衰計算

遮蔽設計を進めていく際、その安全性の目的によって熱発生、放射線損傷、線量率の評価が重要である。各物質についての熱発生、損傷の評価は、線量率と同様放射線束の関係として近似されるが、それらのはっきりした性質の解明は現在、遮蔽の分野で主要課題となりつつある。

現在、得られている最適遮蔽の研究では、線量率を条件として計算する理論が多い。線量を評価する放射線束の計算は、人員あるいは機器の安全性と遮蔽体の、効率に直接ひびいてくるので精度の向上が要請される。

しかしながら最適計算では放射線束を決定する数値がパラメータで与えられる。しかもパラメータの変化

Table 2 Optimization models for various shield optimization codes

	CODE		OPEX ¹⁾	OPERA	ASOP	SHOP	SOP-DP	SOLA ²⁾	DYNOPT
	ITEM								
a	weight		○	○	○	○	○	○	○
	cost		△	△	△	△	△	○	△
	volume					△	△	○	△
	fluxes or their linear combination							○	
b	dimension geometry*		1 PL/CY/SH	1 PL, CY, SH	1 PL, CY, SH	1 CY, SH	1 SH	1 PL, CY, SH	2 PL, CY, SH
	component mixture		—	—	—	—	—	△	—
	arrangement		FIX	FIX	FIX	FIX	○	○	FIX
	layer thickness		○	○	○	○	○**	○	○
c	dose rate		○	○	○	○	○	○	○
	heating							△	
	radiation damage							△	

a: Performance Indexes

(○; available, △; applicable)

b: Optimization Parameters

c: Constraints

* PL...Plane, CY...Cylinder, SH...Sphere

** The minimum layer thickness is more than 10cm

1) OPEX represents OPEX for PL, OPEX-2 for SH, OPEX-3 and OPEX-N for PL, CY, or SH.

2) SOLA represents SOLA-1 (with free-end point), SOLA-2 and SOLA-3 (with fixed-end point)

による放射線束の影響を数多く計算する必要がある。それゆえ、放射線束の計算は精度と計算時間とが調和するような方式を考慮しなければならない。

一般の原子炉の場合、対象とする放射線は中性子とガンマ線である。中性子線量に関しては、高速中性子が重大な役割をはたす。ところで低速ないし熱中性子はそれ自身線量に寄与することは少ないが、物質と (n, r) 反応によって捕獲ガンマ線となる。これは速中性子の非弾性散乱による2次ガンマ線とともに、ガンマ線による線量として、遮蔽体の外周における線量の支配的な要素となる。

最適化研究の初期の段階では放射線の減衰を指数関数近似で評価し、取り扱われた放射線の種類も限られ

ていた。しかしながらソフトウェア・ハードウェア両面で急激な発展をとげた計算技術と相まって、現在ではより厳密な多群の除去-拡散コード、ボルツマン方程式の S_N 解法によるコードさらにはモンテカルロ法等が組み入れられるに至った。

Table-1 に各最適遮蔽の研究に適用された最適化の手法とともに減衰計算の手法を最適化の理論の中へ直接組み入れているか補助的に使っているかの区別ももつけて一覧表にしてある。

上述した減衰計算に利用される遮蔽定数は炉心計算用に準備された核定数ファイルから編集している。

このため、遮蔽材として用いられる元素のデータが無いもの、さらには2次放射線に関するデータは熱中

性の捕獲ガンマ線のデータを除き、ほとんど存在しない。

このような定数の不備は、最適遮蔽の計算において最適な遮蔽物質の選択あるいは最適な遮蔽構成での遮蔽効果の確認などに対して不安が残る。

遮蔽設計法の確立のため各種の精度良い計算手法が開発されてきた現在、遮蔽定数の整備、評価の研究は急務なものであり、わが国でも原子力学会の遮蔽関係の専門委員会および当所などで取り組みはじめた。

4.3 最適化のモデル

上述の 4.1 で扱った遮蔽体のパラメータは互いに関連し合い問題を複雑にしている。さらに、適用する最適化の手法によって遮蔽体最適化のモデル構成に制限が加わる。最適化の手法とモデルとの関係は第5章および第6章で比較検討されるが、ここではモデル構成の方法および問題点を統一的に検討する。

遮蔽の設計段階で遮蔽体の構成を定める手順は

- (i) 遮蔽材料の選定
- (ii) 遮蔽形状の決定
- (iii) 遮蔽体構成の決定

である。

(i) は線源に関して線種、線質などの考察、遮蔽体設置に伴うコストの比較、工学的、工作上および施工上の要求などが参考にされる。

(ii) は重量の制限、設計施工上の制限、他機器との関連などから空間的制限および検査上の必要性などが考慮されねばならない。

(iii) は多重層か単一層かの問題、多重層構成の場合には層の厚さとともに配列の検討が要求される。

いままでに得られた遮蔽体最適計算の理論では大多数が多重層遮蔽体に対する各層の厚さを決定するものであった。この場合、遮蔽材は多重層を構成する2種類以上の材料があらかじめ与えられ、形状は平板・円筒あるいは球形状として理想化され、層状数および層の配列順序も計算前に仮定しなければならない。

研究の初期段階では単一層遮蔽体に対して、物質の混合比を求める問題あるいは遮蔽形状を求める問題が扱われた。このうち、遮蔽形状を求める問題は遮蔽材を仮定して線量などの終端条件を空間的に与えて、基準点からの距離を定めることになる。よって多重層遮蔽体の各層の厚さを求める問題に対して特殊な一例とみなすことができる。数は少ないが現在でも研究されている。

これに対して混合比を求める問題は、コンクリートなどの混合物質の成分比を決める問題と、多重層遮蔽

体の構成比を決める問題との2種類にわけられる。さらに、多重層の構成比を決めるには近似的に構成している遮蔽物質を混合物質とみなして取り扱われる。

この問題は、構成している物質を与え理想化された形状に対してその混合比（あるいは構成比）を

a) 与えられた遮蔽体の厚さで、混合比を変えることによって線量の評価をおこない、混合比の値による遮蔽（減衰）特性を知るパラメータ・サーベイ的方法。

b) 混合比を変数として、混合物質の遮蔽定数を各成分の遮蔽定数と混合比との簡単な関数関係を仮定して直接最適計算による方法。

で求められる。

以上のモデル化で多重層遮蔽体に対する層状数の問題、層の配列順序の問題を解決しようとしたのが著者らの研究であり、同時に混合比も b) の方法で解く理論を確立した。

4.3.1 モデルの検討

遮蔽材の選定：実際の遮蔽に使用される遮蔽材の中には、単一物質によるもの（例えば鉄、鉛、水）のほかに混合物によるもの（例えばコンクリート、ボロン水など）がある。混合物による遮蔽材ではその混合比を定めなければならない。上述したように混合比の決定は a), b) 2方法があるが、b) の方法は混合物質の遮蔽定数が混合比と各成分の遮蔽定数との関数として簡単にあらわされれば（例えば線形関数）有効であるが一般には困難である。a) の方法は計算あるいは実験によってデータがとりやすく、単一層の遮蔽材を選定する場合には有効である。

a), b) 2方法による混合比の決定には近似的に多重層遮蔽体の構成比を決める問題に適用できる。ただし、この場合には a) による方法は計算だけに限られる。

これまでにおこなわれた最適遮蔽の計算で b) の方法で混合比が求められる最適化の手法は、変分法、線形計画法およびポントリヤギンの最大原理にもとづいたものである。

多重層遮蔽体における構成の決定：特に遮蔽特性を良くするため、中性子用に水素を含んだ軽い物質とガンマ線用に重い物質とから成る多重層で構成するのが一般である。多重層で遮蔽体を構成した場合、構成する物質はあらかじめ与えるものとして、層状数、層の配列および各層の厚さを決定しなければならない。

厚さのみに注目した研究は、層状数、層の配列はあらかじめ与え各層の厚さ（あるいはその変化分）を変

数とし評価関数（例えば重量）および制限条件（例えば線量）を厚さの関数としてあらし最適化の手法を使って制限条件を満足し、かつ、評価関数が最適値になるような関係式を導く。この関係式から各層の厚さを求める。厚さは非負の実数値として取り扱われ通常層の順序に列んだベクトル量で評価される。重量および線量は各厚さに対して連続的に変化し、かつ、微分可能であるから、取り扱う関数の面からは最適化の手法に関する制限はほとんど無い。

厚さを求める問題に適用された最適化の手法は、変分法、線形計画法、傾斜法および動的計画法である。また、この種の計算では繰り返し法によるものが多い。さらに、関係式から厚さの修正値を求める段階である層の厚さに対応する数値が負または0になることがある。このような特殊な場合には、通常その層が無いものとして（層状数が減ったものとみなして）調整し計算を続ける。この方法はあくまで便法であって数学的な保証はない。

配列に注目した研究は遮蔽物質を一定とする小区間をできる限り小さくとり、評価関数および制限条件はある基準点からの距離（例えば炉心からの距離）の関数とする。制限条件を満足し、かつ、評価関数が最適値になるような条件から、ある距離に対応した関係式を導く。この関係式から、その注目している距離での物質（すなわち、その距離に対応した小区間内の物質）を求める。この操作を、考えられた遮蔽体の全区間にわたっておこなえば、あらかじめ指定した小区間を層の厚さの最小単位とする遮蔽体が求められる。また、この方法によれば初期条件として与えた層状数が増加する場合もある。あらかじめ与える小区間を小さくすれば、多重層の厚さの問題も包含している。すなわち、多重層遮蔽体の構成を統一的に決定する方法といえる。ただし、評価関数および制約条件が距離の関数であるため、層の境界でそれぞれ連続ではあるが微分不可能となる。このため、微分可能性を要求する最適化の手法ではこのモデルは適用できない。また、理論的には適用できる最適化の手法でも、数値計算をおこなう場合、小区間を小さくすることができない場合がある。

配列を求める問題に適用された最適化の手法は、動的計画法（微分ダイナミック・プログラミング法も含む）である。

5. 問題の解法（その1）

本5章と次章の6章では、各最適化の手法別に計算

コード化され利用可能なプログラムが開発された理論を中心に、仮定された最適化のモデルと取り扱われた例および取り扱い上の注意とを述べる。

第5章では特に外国で開発された理論が中心となり、第6章では一部の研究を除いて著者らが当所で船用炉遮蔽体の理論的研究としておこなった内容を述べる。

5.1 変分法による方法

遮蔽体最適化問題に、古典変分法を導入したのは H. Goldstein & E. P. Blizard¹⁴⁾ であり、さらに G. A. Lisochkin¹⁵⁾ が発展させた。その前後にも、古典変分法の適用による研究は数多く発表されたが、多くは、放射線の減衰計算には指数関数近似が仮定されていた。これらの理論を集大成したのは西独 G K S S の T. B. Enginol & C. Schnier であり、重量最小化問題あるいはコスト最小化問題が取り扱える計算コード SHOP¹⁶⁾ を開発した。SHOPコードに適用されている減衰の仮定は、多重層の各厚さに対する微小変化は指数関数であらわされるものとし、その微小変化に対応する減衰率は、除去—拡散コード RESTRAB¹⁷⁾ で計算される。放射線の減衰過程を指数関数近似であらわしたことにより、変分法による最適化の条件式が簡単になり物理的直観に訴えやすい関係式が導ける利点はあるが、遮蔽形状が円筒・球形状に限られること、最適解が RESTRAB コードによる減衰率の修正により振動するおそれがあること等の欠点がある。

SHOPコードにみられるような指数関数近似による欠点を排除しようとした変分法による理論は米国の W. W. Engle の多重層遮蔽体の重量最小化の研究があげられる。この理論は、変分法によれば多重層の各境界で重量と線量との微小変化分の比が一定であるという性質に着目し、線量の変化分の計算に必要な放射線の減衰計算には1次元 Discrete Sn コード ANISN¹⁸⁾ を直接もちいて各層の厚さを求めようとするものである。この計算方式がコード化され ASOP¹⁹⁾ と名づけられた。以下、SHOPおよびASOP両コードで採用された最適化のモデルと紹介された結果の例示および取り扱い上の注意を述べる。

SHOP

西独で開発された多重層遮蔽体の重量最小化計算コードSHOPは、放射線の減衰過程を次式(1)の指数関数近似で取り扱っている。

$$D(T_1 + \delta T_1, \dots, T_n + \delta T_n) = D(T_1, \dots, T_n) \exp\left(-\sum_{i=1}^n \sigma_i \delta T_i\right) \quad \dots\dots(1)$$

ここで D : 遮蔽体外径での線量
 T_i : i 番目の層における厚さ
 δT_i : i 番目の層における厚さの増分
 σ_i : i 番目の層における放射線減衰率
 n : 層状数

ここで減衰率 σ_i の推定には RESTRAB コードにより求められる。評価関数 J を重量としてあらわせば(2)式ようになる。

$$J(T_1 + \delta T_1, \dots, T_n + \delta T_n) = \sum_{j=1}^n \rho_j \left[\left\{ R_0 + \sum_{i=1}^j (T_i + \delta T_i) \right\}^P - \left\{ R_0 + \sum_{i=1}^{j-1} (T_i + \delta T_i) \right\}^P \right] \dots (2)$$

ただし P は 2 (円筒) あるいは 3 (球)

ここで J : 評価関数 (ここでは重量)

ρ_j : j 番目の層における物質密度

R_0 : 遮蔽体内径

P : 形状因子 $\begin{cases} P=1 \text{ (平板)} \\ P=2 \text{ (円筒)} \\ P=3 \text{ (球)} \end{cases}$

SHOP コードにおける最適化のモデルは(1)式の線量があらかじめ与えられた基準線量 D_0 を保ち、かつ(2)式であらわされた円筒あるいは球形状遮蔽体の重量 (密度 ρ_j をコスト密度 ρ_j^* に変えることによってコスト) を最小にするような n 多重層の各厚さ $T_i + \delta T_i$ を決定することである。ラグランジェの未定係数 $\lambda (>0)$ を導ずることによって次式(3)の関係式が求まる。

$$(\rho_i - \rho_{i+1}) \left[R_0 + \sum_{l=1}^i (T_l + \delta T_l) \right]^{P-1} = \lambda (\sigma_i - \sigma_{i+1}) D \exp \left(- \sum_{l=1}^n \sigma_l \delta T_l \right) \quad i=1, 2, \dots, n-1 \dots (3)$$

あるいは

$$\rho_n \left[R_0 + \sum_{l=1}^n (T_l + \delta T_l) \right]^{P-1} = \lambda \sigma_n D \cdot \exp \left(- \sum_{l=1}^n \sigma_l \delta T_l \right)$$

(3)式から

$$\rho_1 > \rho_2 > \dots > \rho_n \text{ ならば(4)式が導ける。} \\ \sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_n \text{ あるいは} \dots (4) \\ \frac{\sigma_n}{\rho_n} > \frac{\sigma_{n-1}}{\rho_{n-1}} > \dots > \frac{\sigma_1}{\rho_1}$$

ここで σ_i は厚さの逆数、 σ_i/ρ_i は重量の逆数に相当する。SHOP コードを用いて、船用炉生体遮蔽の最適化がこころみられているので一例として鉛-ポリエチレン遮蔽体の重量最小化の結果を Fig. 1 にかかげ

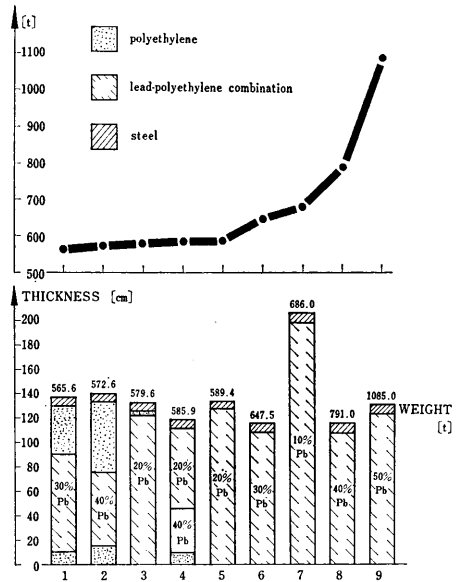


Fig. 1 The arrangement according to weight optimization of the lead/polyethylene biological shield for a ship reactor.

る。

SHOP コードの主な問題点は上述のごとく指数関数近似で減衰計算を取り扱ったことに起因しているが、さらに遮蔽体の混合の割合、層の厚さおよび配列の最適化は各々独立した問題としておこなう必要があり、同時に変えた場合の最適解としての保証は得られない。

ASOP

米国では、特に宇宙飛翔体用原子炉の最適遮蔽の問題を解決するため、放射線減衰計算を現在 1 次元透過計算の主力になっている ANISN コードを使って多重層遮蔽体の重量最小化をこころみる ASOP コードが開発された。ASOP コードにおける最適化のモデルは上述の SHOP コードと同様、線量率 D が基準線量率 D_0 になる条件の下で重量であらわした評価関数 J を最小にする各層の厚さを決定するものである。

最適化の手法はオイラー・ラグランジェの関係式から、各層の境界で、重量と線量率との変化率の値 $\partial D/\partial J$ が等しくなることから近似的に $\Delta D/\Delta J$ の値が等しくなるように各層の厚さを調整する。この厚さの調整にともなって遮蔽構成は変化する。ASOP コードではこの変化した遮蔽構成のもとで ANISN コードによる数値が要求される。

以下に ASOP コードを使用して ORNL が中心と

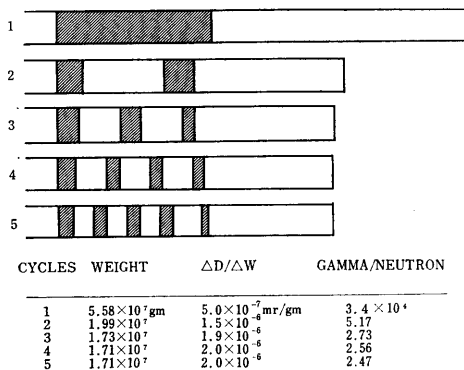


Fig. 2 Effect on shield weight of varying the number of heavy metal layers in the shield.

なり SNAP (Space Nuclear Auxiliay Power) system のため研究された結果を例示し、後に問題点を指摘する。まず遮蔽材の選択の問題に対し、高レベルの放射線および高温に耐えなければならないことから $W-LiH$ 遮蔽、 $W-TiH$ 遮蔽および $LiH-W-TiH$ 遮蔽の 3 種類が候補に上げられ、それぞれ 4 重層遮蔽体として ASOP コードによる計算がおこなわれた。

また、ASOP コードにおける最適化のモデルでは層状数はあらかじめ定められ、最適化の段階では固定されるか、あるいは特殊な場合減少されるかのいずれかである。したがって、層状数を増加した場合の効果を検討するため、重い物質—軽い物質の循環数をパラメータに個々別々に ASOP コードにより計算された (Fig. 2 参照)。

さらに $W-LiH$ の 2 循環数で構成されている遮蔽体に対し、線量率の変化にともなう各層の厚さの変化が求められた。この結果を Fig. 3 に示す。

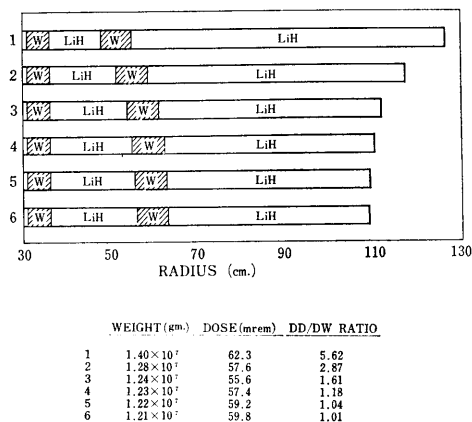


Fig. 3 Two cycle shield weight optimization-ASOP results.

ASOP コードの問題点の 1 つは各層の厚さの変化にともなう ANISN コードによる結果が要求され、ぼう大な計算時間が必要となることである。標準的な問題に対して少なくとも 100 ケース以上の遮蔽構成での ANISN コードによる計算が必要とされる (文献 19) より。また、最適化の段階で層状数の増加が望めないこと、および配列順序も固定されたままであることから初期構成の選択には注意を要する。

5. 2 線形計画法による方法

多種類の数値計画法のうちで、現在、他の分野でもよく用いられているものは線形計画法である。

1947 年に Dantzig がシンプレックス法と呼ばれる効果的な最適解探索法を開発してから、おおいに発展し現在の大型電子計算機の利用と相まって広い範囲の最適計算に応用された。しかしながら取り扱う関数形に強い制限 (一般に線形関数) があるので遮蔽体の最適化問題では線形化した関数系のモデルが組み立てにくくほとんど利用されなかった。

最近になって、英国でシンプレックス法 (Simplex method) を適用した最適遮蔽計算コード McMIN が紹介された²²⁾。McMIN コードで採用された理論は遮蔽体に関するパラメータを線形の不等式であらわされる量と線形ではあらわせない量とにわけて、線形系の関係式から最適解を探索し、得られた数値を使って非線形の条件を満足するかどうかを検討する。

この方法の後半の部分はパラメータ・サーベイになるが純粹のパラメータ・サーベイより効率が良い。ここで放射線の減衰計算は除去拡散コード McBEND²³⁾ 用いている。以下に McMIN コードによる最適化のモデルと計算結果および問題点を述べる。

McMIN

McMIN コードは英国において一連の遮蔽設計コード群の中で、サーベイ・オプションの 1 つとして開発されたものである。最適化のモデルは、厚さ、混合比などの線形不等式であらわされる任意の独立変数と、線量、放射線損傷、熱発生などを評価する独立変数の関数による制限条件のもとで、重量、コスト、外径寸法などの独立変数の関数としてあらわされる評価関数を最適にするように各変数値をシンプレックス法で求めるものである。最適解の求め方は、各独立変数に関して線形の関係式であらわされるものを第 1 の制約条件とし、その他の関係式は第 2 の制約条件とする。第 1 の制約条件と評価関数とから独立変数の値を求め第 2 の制約条件を満足するかどうかを検討する。

McMIN コードを使って高速炉の鉄—黒鉛の格子状

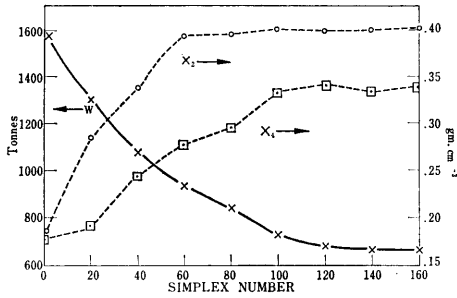


Fig. 4 The progress of the McMIN optimization of the problem for a typical fast reactor shield.

内部遮蔽の重量最小化問題を解いた例では、約 1/3 が第 2 の条件を満足しなかったと報告されている。Fig. 4 にその試計算による結果を示す。

McMIN コードにおける問題点は変数の選び方にある。一般に遮蔽の問題では線形化すると実際の問題をゆがめてしまい、得られた最適解に対するの保証は極めて小さい。設計の初期の段階では McMIN コードは有用だが後期の段階で利用するのは危険である。

試計算で用いられた条件

primary constraints

$$0 \leq X_1 \leq 337.8$$

$$0 \leq X_2 \leq (337.8 - X_1)$$

$$0.2\rho_{Na} \leq X_2 \leq 0.5\rho_{Na}$$

$$0.1\rho_{Fe} \leq X_3 \leq 0.9\rho_{Fe}$$

$$0.1\rho_{Na} \leq X_4 \leq \rho_{Na}(1 - X_3/\rho_{Fe})$$

the secondary constraints

$$A_1 \leq 1.48 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1} \text{cm}^{-3}$$

$$A_2 \leq 3.0 \times 10^8 \text{ sec}^{-1}$$

where, A_1 : saturation disintegration rate of N_a

A_2 : displacement rate of C

5. 3 傾斜法による方法

最初に傾斜法を最適遮蔽計算に適用したのは R. D. Sheffield による宇宙飛行体用遮蔽の重量最小化問題として鉛-水2層の最適な厚さを求める理論である²⁴⁾。その計算結果によれば線形計画法を使用した場合と比較して10%重量軽減化に成功したことが論じられている。その後、傾斜法を用いた理論は数多く発表され、最適遮蔽の分野で初めて計算コード化が Bernik によって進められ、遮蔽設計への適用の道が開かれた²⁴⁾、²⁵⁾。このコードは OPEX と名づけられ、平板多重層の厚さを求める計算に利用される。OPEX コードはその後 G. P. Lahti によって改良が加えられ、球形状

遮蔽体の取り扱いになった(OPEX-II)²⁶⁾。

OPEX-II コードをもとにして日本原子力研究所の遮蔽コード専門部会での最適遮蔽グループでは、形状として平板、円筒、球が取り扱える OPEX-III コードに改良し、さらに共役傾斜法により最適解への加速性を増した OPEX-N を開発した²⁷⁾。

以上の傾斜法による計算方式では重量および線量の厚さに対する偏微分量が要求されるため、偏微分計算を簡単にする目的で放射線の減衰過程は指数関数近似によっていた。これらの偏微分量により厚さを順次修正していく傾斜法では個々の最適化の段階では指数関数近似が許容できて修正数が増加するに従って精度が悪くなる。上述のグループではこの減衰計算の近似にも検討を重ね、現在では、OPEX-N コードに、減衰計算として除去-拡散コード RAC²⁸⁾を組み入れ最適化のある段階で指数関数近似に必要なパラメータを RAC コードにより修正し精度を向上させる方式が考えられた。この方式は OPERA コードとして開発中であるが減衰率の修正によって最適解に収束しない危険性がある。

以上、放射線減衰過程に対する指数関数近似による理論では最適解に対する保証が得られにくい。この点 M. Z. Brainina らの研究²⁹⁾ は線量の偏微分をモンテカルロ法 (Monte Carlo) で求める独特な手法である。この手法は線量自身もモンテカルロ法で求め傾斜法を適用した V. L. Generozov & V. A. Sakovich の研究^{30), 31)} に利用された。この理論によれば本質的には幅広い最適遮蔽問題に応用可能であるが、モンテカルロ法自身の計算時間の問題から使用上制限がある。なお、本理論にもとづいた一般的な計算コードはみあたらない。

以下に各研究で採用された最適化のモデルと試計算の結果の例示と取り扱いの注意点を述べる。なお、OPEX, OPEX-II および OPEX-III コードは形状の取り扱いのみに相異点があるだけで基本となる技法は同一である。また、OPEX-N コードとの相異点は厚さに関する関係式だけで最適化の物理的モデルは全て同一である。OPERA コードは OPEX-N コードが、あらかじめ与えられた初期構成での減衰率を固定して繰り返し計算されるのに対し、遮蔽構成がある許容範囲を越えた段階で減衰率が再計算される。すなわち計算手順の相異だけである。

これらのことから、以下では OPEX, OPEX-II, OPEX-III, OPEX-N および OPERA コード群を統一して OPEX シリーズとして議論を進め、

必要がある場合のみ各プログラム名を表記する。

OPEXシリーズ

OPEXシリーズで取り扱われる最適化の物理的モデルは、厚さを変数として多重層遮蔽体の重量最小化問題を考える。層状数を n として放射線減衰過程を指数関数で近似すれば(5)式ようになる。

$$D_j(T_1 + \delta T_1, \dots, T_n + \delta T_n) \cong D_j(T_1, \dots, T_n) \exp\left(-\sum_{i=1}^n \sigma_i^j \delta T_i\right) \quad \dots(5)$$

ここで D_j : j 番目の粒子による線量
 T_i : i 番目の層における厚さ
 δT_i : i 番目の層における厚さの変化分
 σ_i^j : i 番目の層における j 番目の粒子による減衰係数

全線量 D は J 個の粒子を考えた場合(6)式となる

$$D(T_1, \dots, T_n) = \sum_{j=1}^J D_j(T_1, \dots, T_n) \quad \dots(6)$$

また、重量であらわされる評価関数 J は(7)式となる。

$$J = (T_1, \dots, T_n) = \sum_{j=1}^n \rho_j \left[\left(R_0 + \sum_{i=1}^j T_i \right)^P - \left(R_0 + \sum_{i=1}^{j-1} T_i \right)^P \right] \quad \dots(7)$$

ここで ρ_j : j 番目の層における物質密度
 R_0 : 遮蔽体内径
 P : 形状因子 $\begin{cases} P=1 \text{ (平板)} \\ P=2 \text{ (円筒)} \\ P=3 \text{ (球)} \end{cases}$

(7)式で OPEX では $P=1$, OPEX-II では $P=2$ のみ扱われる。他のコードでは3種類とも使用可能である。

最適化のモデルは、(6)式的全線量が基準線量 D_0 に等しいという条件の下で(7)式の評価関数が最小になるような各層の厚さ $T_i (T_i \geq 0, i=1, 2, \dots, n)$ を求めることである。

傾斜法の基本的なアルゴリズムは、いま、 $\vec{T} = (T_1, T_2, \dots, T_n)$ と各層の厚さを要素としたベクトル表示を使って、与えられた厚さ \vec{T}^0 から出発し $D(\vec{T}) = D_0$ を満足しながら $J(\vec{T})$ の最小になる方向に進めば次第に極小点(最小点ではない)に近づくという原理にもとづく。なお、逐次近似される厚さ \vec{T}^i は次の繰り返しの式で定められる。

$$\vec{T}^{i+1} = \vec{T}^i + k^i \vec{U}^i \quad \dots(8)$$

ここで添字 i は繰り返しの回数, k^i は進み幅, \vec{U}^i は進む方向を示す。また, k^i と \vec{U}^i の選び方にはいくつかの方法が考えられる。OPEX, OPEX-II および OPEX-III の各コードで用いられた Steepest

descent 法では,

$$\vec{U} = \frac{-\vec{g} - \left(\frac{\vec{a} \cdot \vec{g}}{\vec{a} \cdot \vec{a}} \right) \vec{a}}{\left[\vec{g} \cdot \vec{a} - \frac{(\vec{a} \cdot \vec{g})^2}{\vec{a} \cdot \vec{a}} \right]^{1/2}} \quad \dots(9)$$

ここで

$$\vec{g} = \frac{\partial J}{\partial \vec{T}} = \left(\frac{\partial J}{\partial T_1}, \frac{\partial J}{\partial T_2}, \dots, \frac{\partial J}{\partial T_n} \right)$$

$$\vec{a} = \frac{\partial D}{\partial \vec{T}} = \left(\frac{\partial D}{\partial T_1}, \frac{\partial D}{\partial T_2}, \dots, \frac{\partial D}{\partial T_n} \right)$$

また、進み幅 k^i は繰り返し数に関係しない定数 K ($0 < K \leq 1$) で与えられた。

さらに線量の条件を満足させるため、厚さの修正は

$$\vec{T}^{i+1} = \vec{T}^{i+1} + (D_0 - D(\vec{T}^{i+1})) \times \frac{\vec{a}}{\vec{a} \cdot \vec{a}} \quad \dots(10)$$

で与えられる。

OPEX-N および OPERA コードで採用された共役傾斜法 (conjugate gradient) では(8)式に相当する厚さの修正は(11)式で与えられる。

$$\vec{T}^{i+1} = \vec{T}^i + k_1^i \vec{U}_1^i + k_2^i \vec{U}_2^i = \vec{T}^i + \vec{P}^i \quad \dots(11)$$

ここで \vec{U}_1^i は(9)式より求められ, \vec{U}_2^i は \vec{P}^{i-1} として求められる。 k_1^i, k_2^i の関係式は

$$(\vec{P}^i - k_2^i \vec{P}^{i-1}) \tau (\vec{P}^i - k_2^i \vec{P}^{i-1}) = (k_1^i)^2 \quad \dots(12)$$

で与えられる。その他の取り扱いは全て前述したことと同一である。

OPEX-II の試算として球形状 $W-LiH7$ 重層の遮蔽体に関して重量最小化問題が計算された。この計算では前もって ANISN コードのパラメータ計算によって初期構成が選ばれている。Fig. 5 に OPEX-II による繰り返し計算による遮蔽構成の変化をかかげる。

また, steepest descent 法の OPEX-III と conjugate gradient 法の OPEX-N とによる収束加速性の比

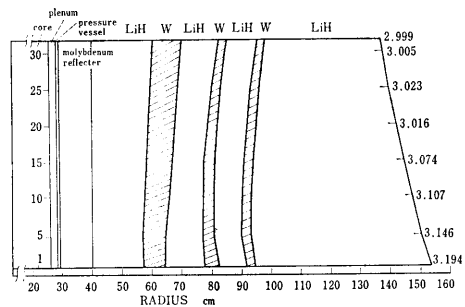


Fig. 5 Optimized LiH-W shield by OPEX-II.

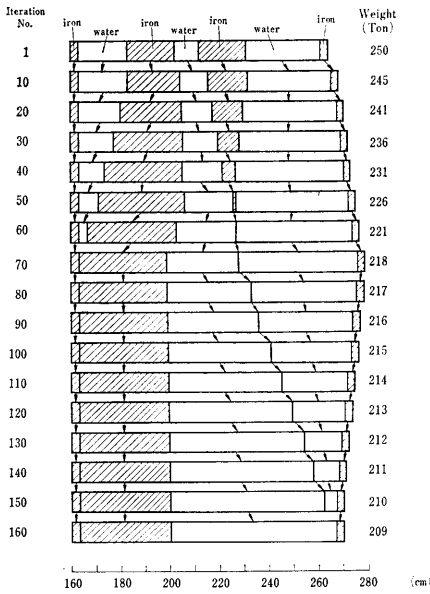


Fig. 6 Optimized iron-water shield by OPEX-3.

較がおこなわれた。取り扱われた問題は船用炉の1次遮蔽体重量最小化問題で球形状の鉄-水多重層である。その結果によるとOPEX-Nの計算では、OPEX-IIIと比較して、繰り返し数は1/3、計算時間では1/2短縮できた。Fig. 6にOPEX-IIIによる結果をかかげる。OPEXシリーズではFig. 8にみられるごとくある層の厚さが負または0になった場合にはその層が消滅したものと計算を続ける。この仮定は場合によっては不相当である (Fig. 7 参照)。

また、初期構成が最適解に近い構成を与えないと、最適化の段階で遮蔽構成が初期構成と大幅に異なったものになり、OPERA 以外では、初期構成のもので、

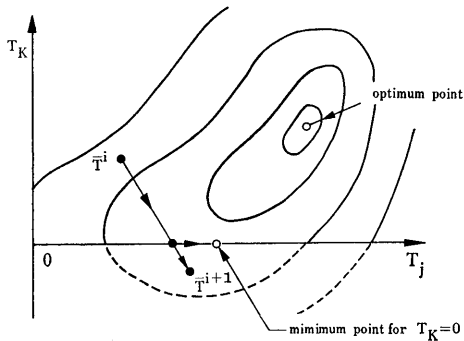


Fig. 7 Illustration of the unacceptable assumption for $T_K < 0$.

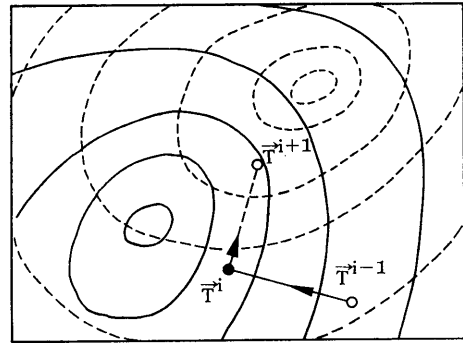


Fig. 8 Changing optimum point when the parameters are alternated.

他の減衰計算コードを使って与えられた減衰特性のパラメータを修正せずに指数関数近似しているため誤差が増大する。OPERA コードはこの点に改良を加えたものである。しかしながら計算の途中で減衰特性が変化するため、修正前の各厚さにおける線量およびその偏微分が変化することになり最適解への収束性に問題がある (Fig. 8 参照)。

6. 問題の解法 (その2)

本6章では Klumpp による動的計画法を適用した研究以外全て著者らによって進められた研究を紹介する。ただし、6.2の微分ダイナミック・プログラミング法による理論およびその理論をもとにプログラムされた SOLA コードの詳細については別報告する予定である。

6.1 ポントリヤギンの最大原理による方法

著者らは、遮蔽材の混合比・多重層の配列および厚さなどの最適化のパラメータが同時に統一的に取り扱える理論を組み立て、汎用の最適遮蔽設計用コードを開発することを研究の目標とした。

本最適化の手法の応用による遮蔽体最適化の理論構成は E. S. Troubetzkoy³²⁾ の流れを継ぐ八田の研究³³⁾ に基礎を置いている。上記の2研究はともに古典変分法によるものなので、炉心からの位置に対し遮蔽物質は連続的な変化をするものとして取り扱われた。

実際の遮蔽体では、遮蔽物質は層の境界で断続的な変化を示す。また、層の境界面では放射線束は連続ではあるが微分値は必ずしも存在しない (Fig. 9 参照)。このような微分値が存在しない関数形を何らかの仮定もあけずに上記の研究に使われたモデルを拡張するため、古典変分法の理論を拡大した、ポントリヤギンの最大原理が採用された。この手法を応用した球形

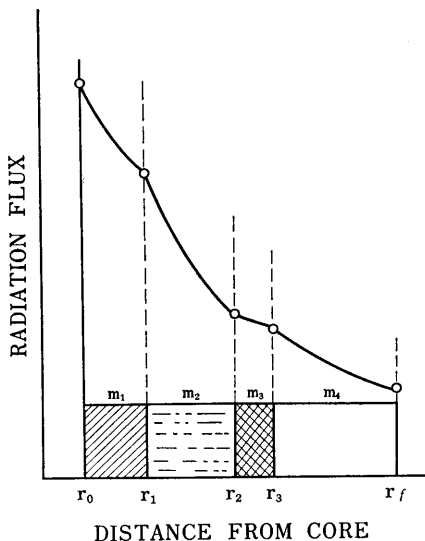


Fig. 9 Non-differentiable points for a radiation flux.

状遮蔽体の重量最小化の方法は1969年にすでに発表した^{34, 35)}。ここでは平板・円筒および球形状遮蔽体に対し、評価関数も重量のみでなくさらに一般化して理論の構成をこころみる。

最適化の条件と減衰計算

第5章で取り扱った各種の最適化の手法に対応したモデル化において、5.2の線形計画法による理論の他は全て多重層の各厚さが独立変数として組み立てられている。このようなモデルでは最適化のパラメータのうち厚さの変化に対応した最適解は、他のパラメータ（遮蔽物質・多重層の配列および層状数）に依存して定まる。それゆえ、最適計算をはじめの前にあらかじめ遮蔽物質・配列および層状数の選択に対して検討する必要がある。

ここでは炉心からの距離を独立変数とし、各距離における遮蔽物質を定める。この最適化のモデルは、放射線束ベクトル $\vec{\phi}$ 、線量率変換係数ベクトル \vec{F} として遮蔽体の外周 r_f における線量率 $D(r_f)$ は

$$D(r_f) \equiv \vec{F}^T \cdot \vec{\phi}(r_f) = D_0 \quad \dots\dots(13)$$

ただし、 D_0 は設計基準線量率また、 \vec{F}^T は \vec{F} の転置行列をあらわす。放射線の減衰計算は H. Schultzらによって提案された連立微分方程式近似による。

$$\frac{d\phi_j(r)}{dr} = -\phi_j(r) \left[\mu_j - \frac{d \ln G(r_0, r)}{dr} \right] + \sum_{k>j}^J A_{kj} \phi_k(r) \quad j=1, 2, \dots, J \quad \dots\dots(14)$$

ここで $\phi_j(r)$: 距離 r での j 番目の粒子の線束
あるいはカレント

μ_j : $r_0 \leq r \leq r_f$ の領域で、 j 番目の粒子
に対する減衰係数

$G(r_0, r)$: 形状係数 = 1 ……平板
= r_0/r ……円筒
= $(r_0/r)^2$ ……球

A_{kj} : k 番目の粒子が j 番目の粒子に変換
する際の変換係数

マトリックス表示すれば、物質を m として

$$\frac{d\vec{\phi}(r)}{dr} = M(m, r) \vec{\phi}(r) \quad \dots\dots(15)$$

ここで $\vec{\phi} = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_J)$

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & & & & \\ m_{21} & m_{22} & & & \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \\ m_{J1} & \dots & \dots & \dots & m_{JJ} \end{pmatrix} \quad O$$

$$m_{ii} = \mu_i - \frac{d \ln G(r_0, r)}{dr}$$

$$m_{kj} = A_{kj} \quad \dots\dots(16)$$

次に評価関数の表示方法を検討する。通常、評価関数として用いられるのは (i) 重量 W , (ii) コスト C および (iii) 外径寸法 L である。ここで本理論では1次元化された遮蔽形状を扱うので、評価関数としての容積は (iii) の外径寸法で代用され、さらに外径寸法は遮蔽体の長さ（厚さ）とみなすことができる。

いま、 A_0, A_1 および A_2 を評価関数の結合因子として

$$A_0 L + A_1 W + A_2 C$$

とすれば

- (i) $A_0 = A_2 = 0, A_1 = 1$ の場合 重量最小化
- (ii) $A_0 = A_1 = 0, A_2 = 1$ の場合 コスト最小化
- (iii) $A_1 = A_2 = 0, A_0 = 1$ の場合 遮蔽厚最小化

の問題となる。

よって、より一般化された評価関数 J は

$$J = A_0 L + A_1 W + A_2 C = \int_{r_0}^{r_f} f(m, r) dr \quad \dots\dots(17)$$

となる。ここで

$$f(m, r) = A_0 + C_p \rho(r) \{A_1 + A_2 \rho^*(r)\} r^{p-1}$$

ただし r_0 : 遮蔽体内径 (cm)

r_f : 遮蔽体外径 (cm)

ρ : 物質密度 (g/cm³)

P : 遮蔽形状因子 = 1 (平板)

2 (円筒)

3 (球)

$$C_p: \text{形状による定数} = S \times 10^{-6} \\ = 2\pi h \times 10^{-6} \\ = 4\pi \times 10^{-6}$$

S : 平板の断面積 (cm^2)

h : 円筒の高さ (cm)

ρ^* : コスト密度 ($\$/\text{ton}$)

以上の数量化のもとに、ここで取り扱う最適化のモデルは、(13)式の線量の制約条件を満足し、(14)式の微分方程式で近似された減衰特性をもつ遮蔽体を(17)式の評価関数が最小になるように、各位置で遮蔽材を選定していくことによって求めることである。

許容しうる遮蔽材の検討

遮蔽材として許容できる物質は鉄・鉛などの純物質と、それら純物質の混合体との2種類であるものとする。一般に物質を特徴づける物質のパラメータは、密度 ρ およびコスト密度 ρ^* さらには(16)式の行列 M の要素 (物質定数) m_{ij} ($i \geq j, i=1, 2, \dots, J$) である。これらパラメータの種類が N 個あるものとするれば、 N 個のパラメータ m_i を要素にもつベクトル \vec{m} を

$$\vec{m} = (m_1, m_2, \dots, m_N)$$

とおくことによって、 \vec{m} は物質 m に対応させることができ、 N 次元ユークリッド空間内の1点とみなせる。ここで混合物質を考えて N 次元空間に存在する領域として取り扱う場合、この種の最適化の手法で要請される凸体の条件として次の仮定をもうける。

仮定: 任意の混合物に対する N 個のパラメータは各単純物質の各要素に関する線形結合であらわされる。また、結合因子は混合物を構成して体積比に比例する。

線形独立な純物質 N 個で1つの超平面を定める。

いま、互いに線形独立な純物質を $P (> N)$ 個与えれば S 個の超平面で囲まれた1つの N 次元超立体 V が定まる。それら純物質の任意の混合物は超立体 V の内点

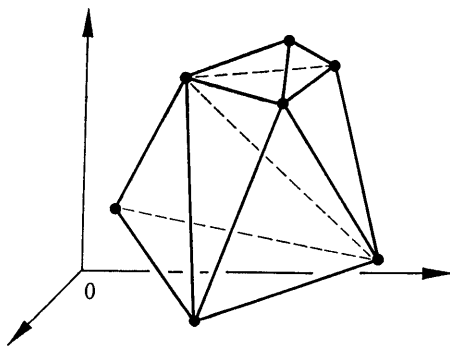


Fig. 10 3-dimensional solid with 7 vertices.

または境界点となる。

Fig. 10 に $N=3$ とした場合の互に線形独立 (この場合同一平面上にない) な7個の純物質による3次元立体 V の様子を図示する。

最適化モデルの数量化および検討

以下、ベクトル空間を使って議論を進めていく。

そのために評価関数と独立変数としての位置 r とを放射線束ベクトル $\vec{\phi}$ と同等に扱うため新たに $\phi_0(r)$, $\phi_{J+1}(r)$ とすれば、取り扱うベクトルは $J+2$ 次元ベクトル $\vec{\Phi} = (\phi_0, \vec{\phi}, \phi_{J+1})$ となる。

これに対応する随伴ベクトルを $\vec{\Psi} = (\psi_0, \psi_1, \psi_{J+1})$ とすれば、 $\vec{\Phi}, \vec{\Psi}$ によるハミルトニアン H は

$$H(\vec{\Phi}, \vec{m}, \vec{\Psi}) = \phi_0 f(\vec{m}, r) + \vec{\phi} M \vec{\phi} + \phi_{J+1} \quad \dots (18)$$

となる。ポントリヤギンの最大原理 (Pontryagin's maximum principle) による最適化の条件として

$$\max_{\vec{m}^*(r) \in V} H(\vec{\Phi}, \vec{m}^*, \vec{\Psi}) = H^*(\vec{\Phi}, \vec{\Psi}) \quad \dots (19)$$

が導ける。ただし \vec{m}^* は最適な遮蔽材とする。

(19)式による線量の条件はいわゆる終端条件となり、 $\vec{\phi}$ の境界条件として示される。さらに最適な遮蔽材 \vec{m}^* は集合 V の中から選ばれるという条件は、超立体 V を構成している超平面によって記述された関係式に対し、ラグランジェ (Lagrange) の未定係数を導入することによってあらわされる。

本手法において基本となる関係式は(19)式である。古典の変分法では極大・極小値を問題にするから、解の前提として、位置 r の全域で関数の微分可能性が要求される。すなわち連続関数でも微分可能でない関数は取り扱えない。また、局所的な最大・最小値は求められるが大域的な最大・最小値は求められない。

これに反し本手法によれば、区別な範囲で微分可能性が成立すればよく、さらに(19)式は最大にする物質を超立体 V の中から選択することを示しているので大域的な最大・最小値問題が扱える。すなわち遮蔽体の最適化問題として、前述のモデル構成は数学的には問題がない。しかしながら許容しうる物質が凸体であらわされる超立体 (物質空間) V の内点および境界点になるように選定された仮定は一部の物質定数 (例えば密度、ガンマ線の減衰係数など) を除いて物理的に問題がある。例えば熱中性子の減衰係数は混合物の場合体積比の線形結合では表現できない。

ところで、本手法は混合比が遮蔽体の各位置で求められるから、上述のような仮定があっても遮蔽体構成法を質的にとらえる場合有効なものであり、混合比を

層の前後の物質を考慮してパラメータ・サーベイによって求められたSHOPの方法に比較して、層状数・配列順序・厚さを含めて統一的に、解析的に解けるので設計の初期段階では有用である。

解法手順

まず、遮蔽材として選べる条件を検討する。物質空間 V に関する条件式を検討することによって容易に、最適な遮蔽材は物質を特徴づけるパラメータ数 N 以下の純物質による混合物であることがわかり、対象となる純物質の物質パラメータによって超平面をあらわす係数をあらかじめ定めておくことができる。

以後は次のアルゴリズムによって解く。

与えられた初期値 $\vec{\phi}(r_0)$ と、何らかの方法で与えられる初期値 $\vec{\psi}(r_0)$ とのもので、ともに連立微分方程式として記述される関係式を使って $\vec{\phi}(r)$ および $\vec{\psi}(r)$ を求めることができる。

各位置 r で物質空間に関する条件式およびハミルトン関数 H を計算し(19式)が成立するような物質 \vec{m} を求める。この操作を遮蔽領域全体にわたっておこない、 $\vec{\phi}$ の境界条件および(13)式の条件を満足するかを検討する。もし満足すれば、求められた各位置での物質 $\vec{m}(r)$ が最適物質 $\vec{m}^*(r)$ をあらわしている。もし、終端条件を満足しない場合には初期値 $\vec{\psi}(r_0)$ を修正する。

ここで純物質のみ、あるいはあらかじめ与えられている成分比の混合物で遮蔽体を構成する場合、すなわち混合比を問題にしない場合には物質空間に関する条件式は不用となり、物質空間 V は離散型に与えられた、物質を示す点の集合となり(19式)は V に含まれる物質から計算されたハミルトニアン H の最大値を求めればよいことになる。

以上、ポントリヤギンの最大原理による理論構成に重点をおき、一般性をもたして議論してきたが、本理論による最大の問題点は随伴方程式の初期値 $\vec{\psi}(r_0)$ を如何に定めるかにある。

6.2 動的計画法による方法

著者らは6.1の最大原理を適用した最適遮蔽構成法の理論をもとに数値計算化するに当り随伴ベクトル(adjoint vector)の初期値を何らかの方法で決定する必要があった。この初期値推定の目的で1970年に動的計画法の適用による理論を確立し、最適遮蔽計算コードSOP-DPを当所に設置されていた電子計算機NEAC-2206(記憶容量用10KW)用に開発した^{36,37)}。

SOP-DPコードは適当に定められた空間メッシュ幅で遮蔽物質は一定とし、与えられた10種類以内の

遮蔽物質の中から選択していく方法で、特に配列を問題にする場合有効である。しかしながら、一般に動的計画法は取り扱う変数が増すと計算機容量が急激に増し、計算量も大幅に増えるという欠点をもっている。

この欠点に対する対策として、動的計画法の基本となるベルマン(R. E. Bellman)の関係式を微分することにより、ポントリヤギンの最大原理による理論構成から導かれた関係式と同等なものになることがわかった。この微分による動的形画法は、微分ダイナミック・プログラミング(differential dynamic programming)法と呼ばれ1966年D. Q. Mayneにより理論が確立され³⁸⁾、D. H. Jacobsonにより拡張されたものである³⁹⁾。

著者らはD. H. Jacobsonにより制御用に開発された理論を応用拡張して、6.1で論議された理論をさらに発展させて最適遮蔽設計に役立つプログラムSOLAコードシリーズを大型電子計算機IBM360モデル195, CDC6600およびUNIVAC1108用に完成させた。現在SOLAコードは3種類開発され、それぞれ異なった最適化のモデルに対して使用される^{40,41)}。

SOLAコードを使用して、当所の布施らによっておこなわれた最適配列の実験的研究と比較⁴²⁾、さらに日本造船研究協会によって進められている船用炉の概念設計に関し1次遮蔽体の最適化問題に対し川崎重工に協力して検討をおこなった^{43,44)}。

一方、W. Klumppは減衰計算を2次元Discrete SnコードDOT-II⁴⁵⁾を用いて、動的計画法の適用による多重層遮蔽体重量最小化問題の計算方式を1971年に発表した。この理論は2次元表現の遮蔽体を一座標軸に対し細分化をはかり他方の座標軸に対して細分化された多重層に対して各層の厚さを求めていくものである。遮蔽体を2次元として取り扱っているため得られる結果は形状の最適化にもつながる。この計算方式で主となる動的計画法による最適化はDYNOPT-2コードで制御される⁴⁷⁾。

(本報告では、この計算方式をDYNOPTと呼ぶことにする。)

以下、SOP-DP, SOLAコードシリーズおよびDYNOPTコードで取り扱われた最適化のモデルと計算結果および取り扱い上の注意を述べる。

SOP-DP

SOP-DPで適用された最適化のモデルと理論構成のために与えられた仮定は次の通りである。すなわち、前6.1で述べられた(13)式に相当する線量率の関係式は(20)の不等式にあらためられた。

$$D(r_f) \equiv \vec{F}^T \cdot \vec{\phi}(r_f) \leq D_0 \quad \dots\dots(20)$$

(14)あるいは(15)の放射線減衰計算は同じ式に従うものとして、これら2条件の下で、重量のみを取り扱った評価関数(17)を最小にする問題に対しSOP-DPは有効である。

上述の最適化のモデルに対して、計算する上での仮定および計算のアルゴリズムは、

- ① 適当な厚さの空間メッシュ幅 $\Delta_i = r_{i+1} - r_i$ を定める。($i=1, 2, \dots, N$)

各メッシュ幅内 ($r_i \leq r \leq r_{i+1}$) で物質 $m(r) = m_i$ (一定) であるものとする。 m_i があらかじめ与えられた10個以内の物質の中から選ばれ、メッシュ Δ_i の前面での放射線束 $\vec{\phi}(r_i) = \vec{\phi}_i$ が与えられれば(15)式より $\vec{\phi}(r_{i+1}) = \vec{\phi}_{i+1}$ が決定される。

すなわち

- ② 放射線束 $\vec{\phi}_{i+1}$ は多段階決定 (multi-stage decision process) に従って定まる。

ベルマン (R. E. Bellman) の最適性原理によって、評価関数 I に関する次の(21), (22)の漸化式がもとまる。

$$I_{n+1}(\vec{\phi}_{N-n}) = \min_{m_{N-n}} [J_{N-n} + I_n(\vec{\phi}_{N-n+1})] \quad n=1, 2, \dots, N \quad \dots\dots(21)$$

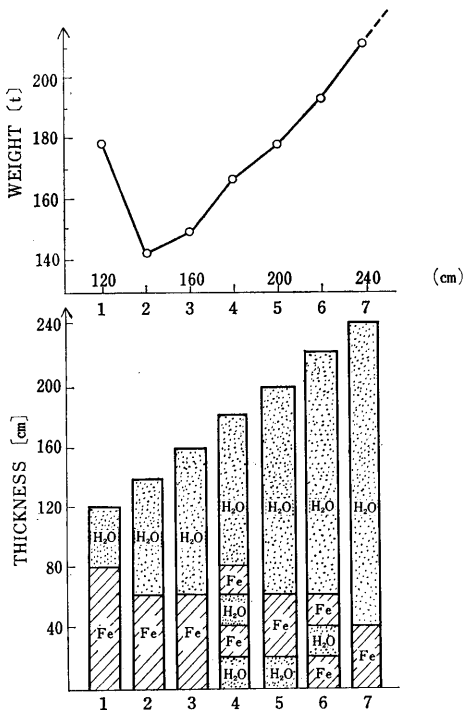


Fig. 11 Optimized iron-water shield arrangements by SOP-DP.

$$I_i(\vec{\phi}_N) = \frac{m_{in}}{m_N} [J_N] \quad \dots\dots(22)$$

ここで J_i は(17)式対応して Δ_i 内での部分重量

$$J_i = \frac{C_p \cdot \rho_i}{P} (r_{i+1}^p - r_i^p) \quad \dots\dots(23)$$

を示す。

ただし、 ρ_i は区間 Δ_i 内の物質密度をあらわす。

この関係式から

- ③ (22)式と(21)式を使って最終状態から逆に初期状態まで、順次、物質系列 m_N, m_{N-1}, \dots, m_0 が求められる。
- ④ ③で求められた物質系列のうち、 $\vec{\phi}_{N+1}$ が(20)の条件を満足し、かつ、 $\vec{\phi}_N$ では(20)の条件を満足しないものが最適遮蔽体を構成する。
- ⑤ メッシュの数を1つ増加し遮蔽体全長をメッシュ幅分増やす。

以後①にもどり計算を続けて遮蔽体の厚さ毎に最適解をみつけていく。

SOP-DPは中性子を2グループ(速中性子, 熱中性子)およびガンマ線を1グループとして球形状遮蔽体の重量最小化の問題に限ってコード化された。SOP-DPを用いて、炉心半径1m, 出力40.7Mwtの船用炉の1次遮蔽を想定して鉄-水, 鉛-水あるいは鉄-水-鉛多重層の最適配列を遮蔽体全長をパラメータにして求めた。

Fig. 11はメッシュ幅を20cmに固定して鉄-水多重層遮蔽体の最適配列および遮蔽体全長の変化による重量の影響を、また、Fig. 12はメッシュ幅20cmによる鉛-水多重層の最適配列を示す。

SOP-DPで用いられた計算の制限は理論上拡張が可能ではあるが、例えば放射線粒子数の増加、空間メッシュ幅の細分化は電子計算機の使用記憶容量の激増をまねき、あまり実用的でないことが判明し、むしろ理論そのものの改良に移っていった。

DYNOPT

動的計画法を最適化の手法として適用した例は最近

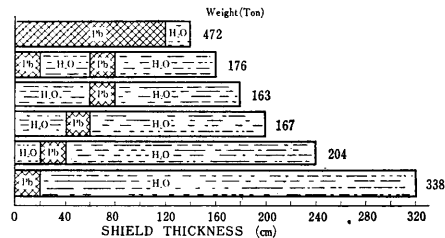


Fig. 12 Optimized lead-water shield arrangements by SOP-DP.

西独の Stuttgart 大学で宇宙飛翔体用遮蔽の重量最小化問題に応用したものがある。この理論は減衰計算に2次元の S_N コード DOT-II を用いている点注目される。計算方式は独立した3つのコードを組み合わせている。すなわち、円筒 r - z 形状の多重層遮蔽体の減衰計算を受け持つ DOT-II コード、最適化の計算中、用いられるパラメータを計算する DOSBE コードおよび動的計画法を適用して最適解を求める DYNOPT 2 コードである。

採用された最適化のモデルと計算手順は次のようなものである。

円筒遮蔽体を同心円環形状に細分割する（必ずしも半径に対して等分割でなくてよい。）この細分割数が動的計画法における段階数を示す。いま、 N 分割されたとする N 段階決定に相当する。分割された遮蔽体毎に軸方向の多重層円環遮蔽体の層の厚さを重量が最小になるように求める。 N 分割分全て厚さが計算されたら DOT-II コードにより放射線の輸送計算をおこない基準線量率の条件を満足するか否かのチェックがおこなわれる。また、重量の減少の割り合いが検討され、いずれかを満足しなかったら、新ためて最適化の再計算がおこなわれる。

これらのアルゴリズムによった計算コード DYNOPT は宇宙船用原子炉の Shadow Shield に対し多重層遮蔽体の各層の形状を求める試計算がおこなわれた。

遮蔽体は軸方向に $LiH-U^{238}$ の二重層からなる円筒形状で、許容線量率は放射線源を1と正規化して $5 \cdot 10^{-8}$ Rad/h とされ、中性子6群、ガンマ線4群とし

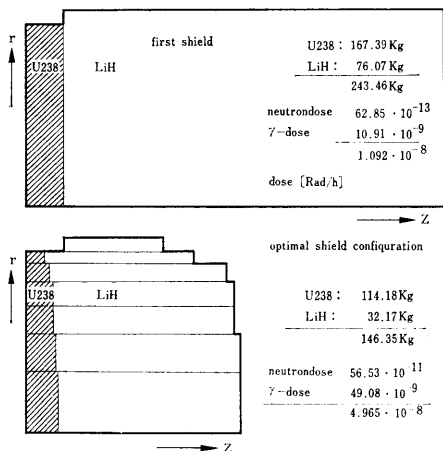


Fig. 13 Initial and optimal U-LiH shield configuration.

て計算された。Fig. 13 に結果をかかげる。

本コードは最適遮蔽の分野で2次元化をおこなった唯一のもので期待されるが、次のような問題点がある。

動的計画法を適用している限り SOP-DP コードの問題点としてかかげた欠点は本コードでも同様である。すなわち層状数（試計算では2層）、分割数（試計算では7）および放射線粒子数（試計算では中性子6、ガンマ線4の計10）の増加はあまり期待できない。また、遮蔽領域を分割して多段階決定していることは数学的に疑問が残る。ある段階ですなわちある円環遮蔽体での放射線束はその内部の遮蔽構成とその円環の内径で得られた放射線束のみから定まるのではなく外部の遮蔽構成の影響もあるからである。

さらにまた、本コードでは最適化の段階で遮蔽構成があまり変化しないことが条件になっている。このため初期構成は最適構成に近いものが選ばれねばならない。

SOLAシリーズ

SOLAシリーズの理論的説明は別報告する予定なので、ここでは取り扱われる最適化のモデルの概要と、計算例および使用上の注意を述べる。

現在、SOLAシリーズコードは3種類の異なった最適化のモデルを考慮して開発されている。すなわち、SOLA-Iは遮蔽体全長を固定しないで、遮蔽体外径 r_f で線量率の条件(13)式を満足し、放射線の減衰過程は(14)式に従うものとする。（放射線減衰計算の仮定は他のSOLA-II, SOLA-IIIも同様である。）これら2つの条件のもとで(17)式であらわされる一般化された評価関数が最小になるように微小なメッシュ幅（通常1cm以下）毎に物質を選択する。

SOLA-IIは遮蔽体全長を固定し、評価関数として(20)式のうち遮蔽厚は固定されるので除いたものにさらに放射線束の線形結合の項を加え、その評価関数を線量率の条件なしに最小になるように物質を選択する。SOLA-IIは結合因子を適当に選ぶことによって線量率の条件がある場合と同じ結果も得られ、さらには重量、コストおよび線量率を同時に小さくする最適解も得られる場合がある。なお、放射線損傷、熱発生を最小にする問題に対してはある放射線束（例えば放射線損傷に対しては速中性子束）を最小にする問題として取り扱うことができる。

SOLA-IIIは遮蔽体全長を固定して、評価関数は(17)式のうち遮蔽厚の項を除いたものとし、線量率の条件(13)を組み入れた。さらに、SOLA-IIおよびSOLA-IIIコードでは固定される遮蔽層も取り扱えるよ

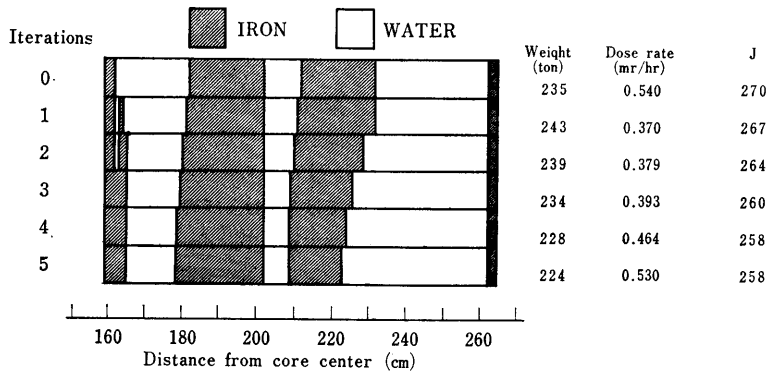


Fig. 14 Optimized iron-water shield by SOLA.

$$J = \text{Weight (ton)} + 65 \times \text{Dose (mr/hr)}$$

J: Performance criterion. Dose; Dose rate due to neutrons and gammas.

うにしてある。

船用炉の1次遮蔽体重量最小化問題をSOLA-IIコードを用いて計算した。この計算はOPEX-IIIおよびOPEX-Nコードと結果の比較をするため同一条件でおこなわれたものである。すなわち、遮蔽体は球形状で内外とも3cmの遮蔽タンクに囲まれた鉄—水多重層であり、同一の初期構成が与えられた。この計算に用いられたSOLA-IIコードに対しての条件は中性子7群、ガンマ線7群および空間メッシュ幅は1cmとされた。SOLA-IIによる結果をFig. 14に示す(OPEX-IIIの結果はFig. 6参照)。

OPEX-IIIおよびN両コードとSOLAコードとによる結果の相違は放射線の減衰計算の相違にもとづく。OPEX-IIIおよびN両コードで用いられた減衰計算の仮定は粒子別による初期構成の減衰計算から減衰率を1つの指数関数近似であらわしたものである。そのため、2次ガンマ線の効果が無視され重量減少に役立つ配列になった。(球形状なので重い物質は前にきた方が得策)OPEX両コードの最終構成をもとにSOLAコードの減衰計算をおこなったところ線量率は基準線量を大幅に上まったものになっていることが判明された。

SOLAシリーズコードは減衰計算に(14)式の微分方程式近似しているので放射線束の絶対値を評価するには精度上問題がある。しかしながら、最適化の段階では遮蔽構成の相違を模擬する相対的な放射線束が求まればよいので、除去—拡散コードMAC-RADとの比較により、ある程度信頼できることが確認された微分方程式近似を最適化の段階で利用し、絶対量が必要となる最終段階あるいは場合によっては途中段階で2次元問題も取り扱えるPALLASコード⁴⁹⁾と組み合わせ

て、遮蔽設計に有用な計算コードにすることが現在計画中である。

7. 各国における最適遮蔽研究の動向

最適遮蔽の理論的研究の歴史をⅢ期に分けるとすれば、第Ⅰ期の開始は1948年L. Tonks & H. Hurwitzの研究によるものである。第Ⅰ期の研究は最適化のモデルを単純化し、遮蔽体最適化の基本的な性質を調べ、傾向を知ろうというものである。第Ⅰ期の後半から現在使われているような最適化の数学的手法を適用した研究があらわれ、第Ⅱ期の計算コード化へ移る。第Ⅱ期は1965年R. L. BernickによるOPEXコード開発にはじまる。この期間の研究は設計の初期の段階で利用される。そして第Ⅲ期は最近の放射線輸送コードと組み合わせて直接設計法の一部を担当する。この期間の最適遮蔽コードは設計用計算コード群の一部とみなされモジュール化されている点に特色がある。第Ⅲ期は1969年W. W. Engle, Jr.による1次元discrete S_N コードANISNを組み合わせたASOPコードに代表される。

以上のような分類に従えば、現在は第Ⅱ期から第Ⅲ期へ移り変わろうとする転換期に相当する。そのため、各国により最適遮蔽に関する研究の取り扱いはいずれ異なる。最適遮蔽の研究は遮蔽条件が厳しい船用炉あるいは宇宙飛翔体用原子炉に関心をよせている国ほど盛んにおこなわれているようである。

第7章では、このような現状にある世界各国が、それぞれの国情に従って、どのように研究を進めてきたか、現在までの成果と今後の方向を探ってみる。

米国 宇宙開発の先進国でもことから、遮蔽の最適問題が早くから注目され、特にNASA (Natio-

nal Aeronautics and Space Administration) の後援により最適遮蔽計算コード化に力がそそがれた。

最近、ORNLではSNAPシステム(space uncl ear auxiliary power system) に対する最適遮蔽の研究がORNLの遮蔽研究の主力として組織上も確立された。宇宙飛行体の最適遮蔽問題を遂行していく段階で特殊な遮蔽材料の特性についても研究が進み遮蔽定数(特に2次ガンマ線のデータ)の問題にも力がそそがれてきている。

最適遮蔽の計算コードは現在放射線輸送コード(1次元 S_N コードANISN)を組み入れたASOPが主力となっている。ASOPの理論は減衰計算方式に対する最適化の手法上からの制限はない。それゆえ、2次元以上の放射線輸送コード(例えばDOT)を組み込んだ計算方式が確立されるであろう。

ASOPは上記の開発研究を遂行していく段階で開発され最適な厚さの決定には有用である。しかしながら遮蔽材料の選択、配列、層状数の検討に対してASOPによるパラメータ・サーベイの方法で所期の目的は果たされたが予算と期間が限られた設計には使用上問題がある。

英国 英国では長い間最適問題は基本的なサーベイ用のものとみなされ、あまり注目されていなかった。

現在では、除去-拡散とMonte Carlo法を結合した1次元McBNDを中心とした遮蔽用コードのモジュール化が進み、その一貫としてシンプレックス法を用いたMcMINコードが開発された。

McMINコードでは取り扱われる現象の数量化に対して高度なテクニックが要求されるが、取り扱える問題に対しての汎用性は他の追随をゆるさない。設計の初期段階ではこのコードの利用によって多方面の角度から検討できる。しかし、精度を要求する問題には適さない。また、非線形の関数による条件が多くなると一種のパラメータ・サーベイの方法になる。

西独 西独では、米国と同様早い時期から最適化の問題に関心が向いており、特にGKSSでは船用炉用に遮蔽材の選択に関して簡単な手法を使ったパラメータ・サーベル的な方法が精力的になされた。この研究を遂行するために開発されたSHOPコードは補助的には除去・拡散コードRESTRABを使っているが、最適化の段階では指数関数近似によって減衰計算がなされている。それゆえ、モデルの単純化によって数値計算は容易になったが、精度上問題があり、適用範囲は設計の初期段階にとどまる。

一方、最近Stuttgart大学で宇宙飛行体用にダイナ

ミック・プログラミング法を用い減衰計算には2次元 S_N コードDOT-IIを採用した計算法が開発された。この計算法はASOPコードを上まわるもので、2次元計算により遮蔽体の形状最適化問題にも適用される。しかしながら取り扱われる放射線粒子の数、層状数、遮蔽体の分割数などに対する制限はASOP以上に厳しい。

日本 1970年に入る2、3年前までは最適化の研究は理論および実験ともに遮蔽の分野ではほとんどなかった。2、3の非常に単純化したモデルによる基礎的研究か、特殊な目的をもった遮蔽に対しパラメータ・サーベイ的におこなわれた研究を除けば1966年に八田が修士論文として発表している研究があるに過ぎなかった。1960年代の後半になって原子力第1船「むつ」の遮蔽設計の経験を通じて、わが国でも独自の最適遮蔽の研究を期待する声が大きくなり、当所では1967年よりJRR-4 No. 1プールを使って鉄-水、鉄-水-鉛多重層の最適配置の実験的研究が開始され、これより2年後の1969年より理論的研究がはじめられ、当時当所にいた片岡が指導した八田の研究を拡張する目的をもって遂行された。

一方、日本原子力研究所では1970年より遮蔽コード専門部会に最適遮蔽研究グループが誕生し当時入手可能だった唯一の計算コードOPEX-2をもとに改良と拡張をめざした。(著者の1人は同専門部会の委員として同グループに参加している。)

当所における理論的研究はその後、特に最適化の手法に関心をよせ、最大原理を応用した理論をまず確立し、数値計算化をめざしてダイナミック・プログラミング法によるSOP-DPコードを発表し、現在、現実に近いモデルで汎用性のあるコードとして微分ダイナミック・プログラミング法による一連のSOLAコードを開発整備した。まだ改良すべき問題は残っているが、当所でおこなわれた実験との比較、日本造船研究協会で計画された第2船以後の船用炉概念設計に関して、1次遮蔽体の最適化に應用され、一応所期の目的をはたしたと思われる。また、日本原子力研究所の最適化グループでは最適化の手法の改良により計算時間の大幅な短縮に成功した。また、減衰計算を除去・拡散コードの組み込みにより精度の上でも考慮された。

以上、2研究所による3種類の研究が1970年代の初期に集中しておこなわれたが、以上の外の研究は現在のところおこなわれていない。

近い将来、最適遮蔽計算コードSOLAと直接積分法による輸送コードPALLASとのモジュール化によ

って厳密な遮蔽設計方式の確立に寄与できるものと思われる。

(なお、ソ連については遮蔽形状に対する最適化の研究が見られるが情報不足のため、あえて省略した。)

8. おわりに

第7章で、特に1970年代における各国の最適遮蔽研究の現状と展望をこころみた。この分野の研究は、船用炉・宇宙飛翔体用原子炉の開発に関連して、数多くの理論計算がおこなわれ、それなりの成果をあげているが、しかし、まだ解決しなければならない問題も残っている。問題には新しい材料に関するデータの集積評価また不備なデータに対する整備・評価を待つもの放射線熱発生および損傷など他の遮蔽の分野の研究成果を期待しなければならないものもあるが、遮蔽の最適化の研究独自の問題も多い。

「最適」という意味は最適化のモデルで仮定された条件をすべて満足する他の解は最適解に比較して評価値が大きい(最小問題に対して)値をとることである。

いままで得られた研究でこの問題を検討したものはなかった。取り扱う最適化の手法によっては極小値を求めるもので、その値が最小値であるという保証のないもの、実際の物理的モデルをゆがめて使用しなければならないものなどがある。さらには細かいことではあるが繰り返し法により最適解の判定を前の評価値と求められた評価との差が許容誤差以内か否かによるものは危険性がある。評価値が最適解に至る途中であまり変化しない状態があり得るからである。

従来の最適化の理論は量的な面から取り上げられていたが、層状数の変化、配列の変化などによる質的な変化に、遮蔽体による効果と損失がいかに影響するか、また遮蔽体の構成上で安定性が保たれるかの解明は安全性の研究にも寄与するものと思われる。

謝 辞

本報告は1970年および1972年に開かれた2回の遮蔽に関する国際会議で発表された各国の研究を中心に取上げた。また、第6章で述べたわれわれの研究は船舶技術研究所における船用炉遮蔽の理論的研究として当時遮蔽構造研究室長であった片岡巖氏(現、三菱原子力工業)が最適遮蔽の理論的研究の必要性をとき、はじめられたものである。今も変らぬご指導をいただいている同氏に篤く感謝致します。

(278)

本研究遂行にあたり、ご助言、ご激励をいただいた中田原子力船部長、佐藤前原子力船部長(現、造船研究協会)、布施東海支所長に篤くお礼申し上げます。

特にSOLAコード開発に当たり、ご指導をいただいた山越遮蔽構造研究室長ならびに竹内遮蔽効果研究室長に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) L. Tonks & H. Hurwitz jr.; The economical distribution of gamma-ray absorbing material in a spherical pile shield, USAEC Report KAPL-76, (1948)
- 2) T. Fuse, A. Yamaji & T. Miura; The optimum arrangement of laminated iron-water shields, Nucl. Eng. Design, Vol. 13, No. 3 (1970)
- 3) H. Schultz & S. Sasse; Analytical estimates for an optimum choice and configuration of materials in reactor shields, ORNL-tr-1526, ABS-TTH 1024, (1965)
- 4) 片岡巖; 原子力船の遮蔽 第8回原子力総合シンポジウム (1970)
- 5) I. Kataoka; Shielding in Nuclear Ships, CONF-700211-2 (1970)
- 6) I. Kataoka & Y. Toyota; Engineering Compendium on Radiation Shielding, Vol. 2 (Springer Verlag, Berlin) (1970)
- 7) 田中義久他; 船用遮蔽と船用原子動力プラントの関連性, 川崎技法 21. (1959)
- 8) 岡島暢夫; 放射線遮蔽の設計および建設の経験と問題点, 第1章, 原子力学会誌 Vol. 3 No. 7 (1971)
- 9) G. Leitman; Optimization techniques, math. Sci. Eng., Vol. 5 (1962)
- 10) 原子炉システム最適化技術研究専門委編; 原子炉システムの最適化技術 (原子力学会) (1971)
- 11) F. W. Krüger; Optimization of a shield for mixed radiation, Kernenergie, 9, No 5, ORNL-tr-1499 (1967)
- 12) 田中義久; 原子炉遮蔽技術の進歩, 第三章 原子力学会誌 Vol. 19 No. 11 (1967)
- 13) W. B. Terney & H. Fenech; Shipboard reactor shield optimization using the optimum gradient method, Nucl. Appl. Vol. 3. 1 (1967)
- 14) H. Goldstein & E. P. Blizard; A criterion for

- the experimental optimization of two-component unit shields.
- USAEC Report TID-5018 (1951)
- 15) C. A. Lisochkin ; The optimum condition for biological shielding against a number of radiation sources, *Sov. J. Nuclear Energy*, 15, 729 (1963)
 - 16) T. B. Enginol & C. Schnier ; SHOP II, ein Programm zur Optimierung von Reaktorabschirmungen, GKSS-Bericht Nr. 69/p 29 (1969)
 - 17) R. Fiebig ; RESTRAB, ein Programm zur Berechnung von Reaktorabschirmungen, GKSS-Bericht Nr. 69/p 21 (1967)
 - 18) W. W. Engle jr. ; A user's manual for ANISN, A one-dimensional discrete ordinates transport code with anisotropic scattering, K-1693 (1967)
 - 19) W. W. Engle jr. ; A user's manual for ASOP, ANISN shield optimization program, CTC-INF-941 (1969)
 - 20) F. C. Maienschein et al. ; Shielding for advanced reactors in the United States, *Nucl. Eng. Design* 15 (1971)
 - 21) J. Butler ; The science of reactor shielding-an end to empiricism in the 1970's, EACRP-A-121 (1970)
 - 5.7 The optimisation code
 - 22) Ibid. 5.2 The McBEND code
 - 23) R. D. Sheffield ; Shield system optimization-gradient non-linear programming, MR-N-186 (NARF-57-62T) (1957)
 - 24) R. L. Bernick ; The OPEX shield optimization code, NAA-SR-TDR 11516 (1965)
 - 25) R. L. Bernick ; Application of the method of steepest descent to laminated shield weight optimization, NAA-SR-memo-8181 (1963)
 - 26) G. P. Lahti ; OPEX-II, A radiation shield optimization code, NASA-TMX-1769 (1968)
 - 27) 中山, 宮越, 金井, 久保 ; 多重層遮蔽の最適化計算 (遮蔽コード専門部会) JAERI-memo 近刊
 - 28) 大島編 ; 原子力船の遮蔽計算コードに関する試験研究, 原船協-45 (原船協開発部会機関関係分会) (1963)
 - 29) M. Z. Brainina et al. ; Calculation of dose derivatives by Monte Carlo for optimization of shape and composition of shields, ORNL-TR-1884 (1967)
 - 30) V. L. Generozov & V. A. Sakovich ; Optimization of the shape of a shadow shield by the Monte Carlo method, *Atomnaya Energiya*, Vol. 28, No. 2 (1970)
 - 31) V. L. Generozov & V. A. Sakovich ; Optimization of the shape of a shadow shield against neutrons from a surface source by the Monte Carlo method, *Atomnaya Energiya*, Vol. 30, No. 6 (1971)
 - 32) E. S. Troubetzkoy ; Minimum weight shield synthesis, UNC-5017 (part A) (1962)
 - 33) 八田洋 ; 遮蔽体の最適化に関する理論的研究, 東大修士論文 (1966)
 - 34) 金井, 片岡 ; 球状遮蔽体の最適化に関する理論的研究, 船舶技研発表会 14 (1969)
 - 35) 金井, 片岡 ; 球状遮蔽体の最適化に関する理論的研究, 原子力学会分科会D5 (1969)
 - 36) 金井, 片岡 ; 球状遮蔽体の最適化に関する理論的研究 (そのII) 船舶技研発表会 18 (1970)
 - 37) 金井, 片岡 ; 球状遮蔽体の最適化に関する理論的研究II ダイナミック・プログラミング法による数値解法, 原子力学会年会A2 (1970)
 - 38) D. Q. Mayne ; A second-order gradient method of optimizing non-linear discrete time systems, *Int. J. Control*, Vol. 3, No. 1 (1966)
 - 39) D. H. Jacobson ; Second-order and second-variation methods for determining optimal control ; A comparative study using differential dynamic programming, *Int. J. Control*, Vol. 7, No. 2 (1968)
 - 40) 金井, 伊藤, 片岡 ; 遮蔽体の最適化に関する理論的研究, 最適配列について 原子力学会年会C52 (1971)
 - 41) 金井, 伊藤 ; 遮蔽体の最適化に関する理論的研究 最適配列(その2) 原子力学会分科会E36 (1971)
 - 42) Y. Kanai, A. Yamaji & K. Takeuchi ; Shielding optimization by differential dynamic programming method and experiment, 4-th Int. conf. reactor shielding CONF-721018-23 (1972)
 - 43) 金井, 伊藤 ; 船用炉の最適遮蔽設計の研究, 1次遮蔽体の最適化(1) 原子力学会分科会E34 (1972)
 - 44) 金井, 伊藤 ; 一体型船用炉の最適遮蔽設計の研究

- 1次遮蔽体, 船舶技研発表会 (1972)
- 45) F. R. Mynatt ; A user's manual for DOT, USAEC Report K-1684 (1969)
- 46) E. Amin et al. ; Development of calculation methods and codes and their application to space reactor shielding 4-th Int. Conf. reactor shielding (1972)
- 47) W. Klumpp ; DYNOPT-2 manual, IKE Report (1971)
- 48) 竹内清 ; 中性子遮蔽解析に用いる輸送方程式の数値解法の研究, 船舶技研報告 第9巻, 第6号 (1972)
- 49) S. Miyasaka & Y. Higashihara ; Today's activities on reactor shielding studies in Japan, Joint ENEA/IAEA Specialist Meeting, Paris (1970)