

中性子科学研究計画（原研）と大型ハドロン計画（KEK）の 統合計画における施設遮蔽設計の現状

日本原子力研究所

中島 宏

nakasima@shield4.tokai.jaeri.go.jp

1. 序

原研中性子科学研究計画及び KEK 大型ハドロン計画の統合計画¹は、大強度高エネルギー陽子加速器により作り出される陽子ビームを用いて、最先端の基礎科学や新たな原子力技術開発を展開することを目的としている。本計画における施設は、600MeV 陽子リニアック、3GeV 及び 50GeV 陽子シンクロトロン加速器群を中心として構成される。この加速器群により作り出されるビーム出力は、第1期において 3GeV-333 μ A(1MW)及び 50GeV-15 μ A であり、第2期では 5MW に増強することを予定している。この加速器群を中心として、600MeV ビームを用いる加速器駆動核変換実験施設、3GeV ビームを用いる生命・物質科学実験施設、50GeV ビームを用いる原子核・素粒子実験施設、ニュートリノ実験施設が建設される。(図1)ここでは放射線の観点から、各施設設計の現状について報告する。

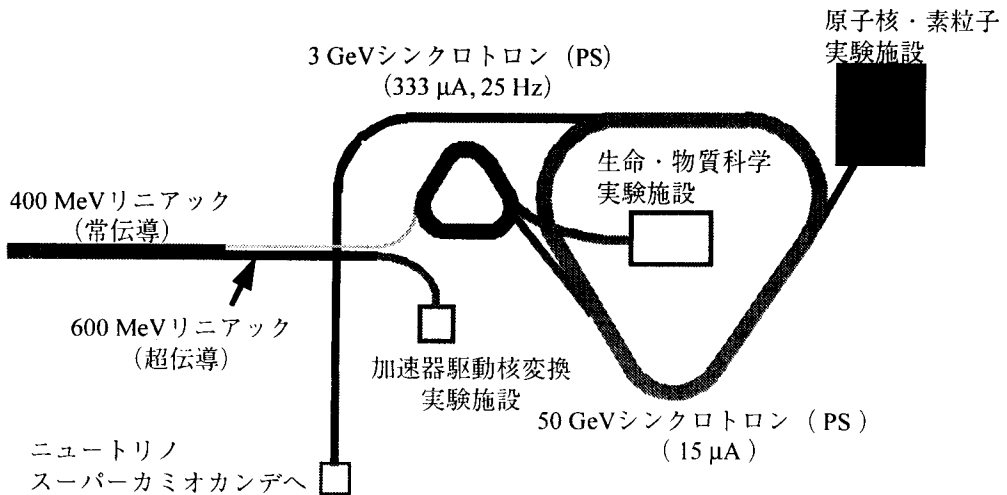


図1 統合計画概念図

2. 施設遮蔽設計基準

本計画における施設の主たる部分を占める加速器施設は、リニアックでは長さ約 600m、3GeV 及び 50GeV シンクロトロンではそれぞれ周長約 300m と約 1.6km である。加速器施設は放射

線対策上すべて地下に設置されるが、その設置深度は、遮蔽設計基準、建設コスト、全体の施設配置計画等との兼ね合いで決定される。本施設の遮蔽設計は、放射線対策の設計目標値として、表1に示す値を用いて行っている。

表1 統合計画における遮蔽設計目標値

		設計目標値	法令
事業所境界	スカイシャイン	35 μ Sv/y	1mSv/y
事業所内一般区域		0.2 μ Sv/h	1mSv/y
常時立ち入り可能な管理区域		12 μ Sv/h	1mSv/w
土壌の放射化	点状線源	11.4mSv/h	1mSv/y
土壌の放射化	線状線源	1.14mSv/h	1mSv/y

事業所境界での設計目標値は、2期に予定している施設を含めた全施設からのスカイシャイン等の放射線による寄与を合わせて 35 μ Sv/y としているが、これは放射線障害防止法の基準の 1/20 に、更に余裕をみた値である。事業所内一般区域に対する 0.2 μ Sv/h は、滞在時間を週 40 時間、年間 50 週とし、更に余裕を見て、定めた値である。常時立ち入り可能な管理区域についても、週 40 時間の滞在時間を考慮し、更に余裕を見て設定している。土壌の放射化については、事業所外に流れ出た地下水を飲んだ人の被曝が、10 μ Sv/y を超えないように定めている。これは、法令の 1% であり、自然の放射線による被曝に比べて無視できる量である。この基準を満たすためには、点状にビーム損失すると仮定している施設の遮蔽体外側で 23mSv/h にする必要があり、線状に一樣ビーム損失すると仮定している施設についてはその 1/10 とし、更に余裕を見て目標値を定めている。

この施設設計において、放射線対策上最も問題となるのは放射線線源条件となるビーム損失率の設定である。現在この条件を、加速器施設では基本的に 1W/m の一樣損失と設定している。これは、加速器機器の Hands on Maintenance の要請から設定されたもので、KEK 等既存の加速器施設における経験²から、修理・保守点検する際の作業員の被曝を考慮したものである。加速器の入射部・出射部及びビームダンプについては、点状線源とし、別途個別に設定している。また、各実験施設におけるターゲットについても、施設性能を決める基本パラメーターとして、個別に設定している。

3. 施設遮蔽設計法

施設遮蔽設計では、先に述べた事業所境界・管理区域境界における線量及び土壌の放射化量を評価するため、バルク遮蔽厚さ、放射線ストリーミング、スカイシャイン、機器、機器冷却水及び施設内の空気放射化を検討する必要がある。現在の概念検討の段階では、施設の遮蔽

体厚さを決めるために、これらの評価には基本的に実測値に基づく簡易計算手法を用いている。一方、加速器入・出射部、ターゲットやビームダンプ等複雑形状においては、詳細放射線輸送計算が必要となることが予想され、Sn 法及びモンテカルロ法の使用を予定している。以下に、各検討項目別に使用している若しくは使用を予定している計算法について述べる。

3.1 線源評価

加速器施設では、バルク遮蔽の計算に Moyer Model 等^{3,4}を用いているために、その計算には線源評価を必要としない。しかし、入射部・出射部及びビームダンプについては、現在 NMTC/JAERI-97⁵や MARS13⁶と MCNP-4A⁷を組み合わせたモンテカルロ法で、線源評価が進められている。また、放射線ストリーミングや放射化量評価のための線源を計算するためにも、これらのコードを用いている。各実験施設における線源評価については、施設の最適化設計にも関連するため、後にまとめて述べる。

3.2 バルク遮蔽

バルク遮蔽における放射線透過計算に関して、1GeV 以下の施設については Tesch の式³を、1GeV 以上の施設については KEK パラメーター⁸による Moyer Model⁴を用いて行っている。これらの計算手法は、本施設のように複雑な加速器施設群を同一基準で短期間にまとめて計算するには極めて有効な手法であり、全体的な施設設計の妥当性検討に用いている。しかし、この計算法は、加速器施設におけるビーム損失を想定したものであるため、その仮定からターゲットやビームダンプの様な線源と遮蔽体が一体化した計算には適さない。そこで、これらの計算体系に対応するため、線源計算結果を基に、HILO86 群定数セット⁹及び ANISN¹⁰、DORT¹¹等の Sn コード若しくは NMTC/JAERI-97 や MARS13 及び MCNP-4A による検討を進めている。但し、HILO86 は 400MeV 以下のデータしかなく、また核種も限られているため、HILO86 の拡張が期待される。米国 SNS プロジェクトでは、1.4GeV までの拡張が済み、設計に使用しているが、未だ公開されていない。¹²

3.3 ストリーミング

本施設では、ケーブル、RF 導波管、冷却水管等、無数のダクト及び搬入口等の迷路状通路が設置される。これらの膨大な種類の放射線ストリーミング計算に対応するため、Tesch の式¹³や中村・上蓑の式^{14,15}等の簡易計算手法を使用することを基本としている。また、より詳細な設計に対応するために、DUCT-II¹⁶を高エネルギー用に改良した DUCT-III と先に述べた線源スペクトルを結合した計算法の整備を進めている。

3.4 スカイシャイン

この計算は、事業所境界における全施設からの寄与を評価しなければならず、特に本施設の

様に地下に設置される場合に、その設置深度に大きく影響し、建設コストに直接反映するため、設計の早い段階から簡易計算手法、Stapleton の式¹⁷、を用いて行っている。現在、更に精度を向上させるために、SHINE-II¹⁶ を高エネルギー用に拡張した SHINE-III の整備を行っている。この改良では、NMTC/JAERI-97 及び MCNP-4A を用いて計算した 3GeV までのレスポンスを関数でフィッティングし、その結果をパラメーター化してコードに組み込んでいる。

3.5 放射化量評価

ターゲットの放射化量を評価することは、その施設設計においてターゲット交換の様な保守のシナリオの設定に重要である。特に、本施設の生命・物質科学実験施設では、ターゲットとして水銀を用いる場合、その閉じこめ構造を設計する際に重要である。このターゲット放射化量の生成評価には、NMTC/JAERI-97 及び MCNP-4A を用い、核種崩壊による放射エネルギーの時間変化を DCHAIN-SP¹⁸ を用いて計算する方法を使用する予定であり、現在その精度評価が行われている。

加速器機器における放射化及びそれによる周辺線量は、先に述べた遮蔽設計基準である 1W/m のビーム損失を規定したように、機器の保守点検の際の被曝量を低減化するために、ビームロス量と関係において評価しておくことが必要である。この評価には、ターゲットと同様の方法による計算も行っている。しかし、加速器機器の場合、その構造が非常に複雑であるため、その計算は煩雑なものとなる。そこで、NMTC/JAERI-97 や MARS13 で star density (非弾性散乱確率) を計算し、それに ω -factor と呼ばれる換算係数を乗ずることにより、簡便に contact dose を評価する方法¹⁹ の採用を検討しており、現在その精度評価を行っている。

施設内空気や加速器機器・ビームダンプ等の冷却水の放射化量の評価は、その生成量を用いて、施設の密閉構造や空気や冷却水の取り扱いシナリオ及び空調機器や冷却水循環機器の能力を決める必要があることから重要である。これらの生成については、簡易計算式により求めた線量から、中性子スペクトルを仮定し、それに放射化断面積を乗じて求めたり、線源評価により得た陽子・中性子スペクトルから求めている。この場合、評価上重要となる核種生成断面積が想定される全ての核種について必要となる。しかし、全ての断面積が測定若しくは計算されているわけではないので、断面積が無い場合、しきい値以上の断面積を一律 30mb と仮定して計算している。今後、核種生成断面積について高エネルギー核データの整備が望まれる。

このようにして得た時間依存の放射エネルギーから、空気、冷却水の総量及び換気、入れ替え回数を仮定し、空気中、冷却水中の放射能濃度を算定する。これを、法令に定められた排出濃度と比較することを繰り返し、施設全体の構造、機器能力を決めている。

本施設の大半は地下に設置されるため、それらの施設における遮蔽壁の厚さは、土壤の放射化量に対する設計目標値を満たすように決められている。土壤の放射化を各施設個別に詳細計算法により計算することは、膨大な時間を要するため、現在一律に、3.2 に述べた簡易計算式により求めた線量から評価している。

4. 実験施設

本計画の各実験施設では、大強度のビーム出力を最大限に生かすために、ターゲット等の設計において、最適化設計が現在進行中である。

加速器駆動核変換実験施設では、加速器駆動未臨界炉心特性及び Pb/Bi 熱流動特性に関する実験が行われる。この未臨界炉心設計における炉心核特性・燃焼特性解析には、NMTC、TWODANT²⁰ 及び BURNER²¹ を中心とした ATRAS コードシステム²² が用いられており、今後 ORIGEN-II²³ の導入も予定されている。動特性解析には、EXCURS²⁴-TWODANT を中心として、改良準静的近似や時間依存曲面座標を用いた直接解法を検討している。これらの計算において、特に問題となるのは、マイナーアクチノイドの断面積や核分裂中性子エネルギースペクトルの精度であり、これらの評価が望まれる。

生命・物質科学実験施設は、中性子散乱実験施設、不安定核実験施設、ミュオン実験施設から構成される。中性子散乱実験施設では、水銀ターゲットを用いた核破砕中性子源から時間・エネルギーに高分解能を持つ冷・熱中性子を効率良く取り出すために、ターゲット、減速材、反射体等の材料選択、配置構成に係わる最適化設計を、NMTC/JAERI97 及び MCNP-4A を用いて進めている。冷・熱中性子の計算には、特に、散乱 kernel、即ち H_2 の $S(\alpha, \beta)$ 、の精度が、エネルギースペクトルやパルス構造に大きく影響するため、現在、新たな kernel の入手を検討している。また、この計算には、膨大な計算時間を要し、精度に影響を及ぼしているが、今のところ計算機速度の向上以外にその解決策がなく、今後新しい手法の開発が必要である。

不安定核実験施設では、3 GeV の大強度陽子ビームの核破砕反応等によって生成される種々の大強度短寿命核ビームを用いて、原子核物理、天体核物理、物質科学、核化学等の新しい研究領域の展開が期待されている。ここでは、ターゲットにおける放射性原子核の生成量評価に Rudstam の評価式²⁵ を改良したコード²⁶ を用いている。これは、高エネルギー陽子で生成される放射化物の生成量を適当な関数で表現したもので、近年、核分裂過程によるもの、移行反応による寄与等、細かな反応の違いによる補正項を含むように改良が進められている。²⁷

ミュオン実験施設では、3 GeV の大強度の陽子ビームを用い、ミュオン基礎物理や磁気プローブとして用いる物性研究、負ミュオンの特殊な性質を用いた非破壊分析、ミュオン触媒核融合研究等が展開される。この施設では、ターゲット等でのエネルギー損失等の評価、輸送計算、スクレーパによる効果や配置の検討に、PSI、TRIUMF 研究所で開発、改良された REMVOC、TURTLE コード²⁸ 用いている。ターゲットでのミュオン生成量の評価には、パイオンの生成断面積を用いたモンテカルロ法により生成量を評価し、更にその引き出しの効率の評価を TURTLE コードを用いて設計を行っている。

原子核素粒子実験施設やニュートリノ実験施設では、陽子1次ビームや大強度K中間子、 π 中間子等の2次ビームを用いた原子核・素粒子物理学の研究が行われる。 π 中間子、K中間子や反陽子のビームライン及びターゲットの設計のために、解析的な Sanford-Wang の式²⁹ や

Taylor の式³⁰を用いている。また、ニュートリノビームラインや K_0 ビームラインのような場合は、これらの式を取り込んだ event generator として GEANT³¹を用いている。ビームダンプの設計では、0度方向について Thomas の式³²を、ミュオン対策として、Sullivan の式³³をそれぞれ使っている。また、ニュートリノビームラインのようなビーム軸方向に沿った遮蔽設計では、MARS を使用している。

5. まとめ

これまで述べてきたように、全体の施設設計及び安全性の評価は、施設が非常に広いエネルギー範囲、粒子種を取り扱うことと、迅速な対応が求められることから、現在まで大半は、経験式や簡易計算式によって行われている。今後、更に詳細に全体設計が進められるが、それには、合理的な運転シナリオ及び合理的な放射化物取り扱いシナリオの策定と共に、詳細で精度の良い設計手法が、詳細設計が開始される前に求められる。特に、複雑な体系や特に強い線源となる箇所については、安全性確保とコスト削減のために、詳細な線量及び放射化量評価に基づいた設計が必要である。また本計画では、中性子源の増強を中心とした2期が予定されており、更に、加速器駆動未臨界炉に関する核変換工学のように、長期にわたる研究が進展する。これらには、計算コードの開発と共に、精度の良い断面積データは欠かせないものであり、現在原研核データセンターで進めている高エネルギー核データ評価に期待したい。

謝 辞

本報告は、統合計画共同推進チームで行われた検討について纏めたものである。

参考文献

1. The Joint Project Team of JAERI and KEK: The Joint Project for High-Intensity Proton Accelerators, JAERI-Tech 99-056 (1999).
2. Yamane, I.: Radiation Protection Measures for the Maintenance Service of JHF 3-GeV Ring, KEK Internal Report 98-7 (1998).
3. Moyer, B. J.: "Method of Calculation of the Shielding Enclosure for the Berkeley Bevatron" in Proc. 1st Int. Conf. Shielding around High Energy Accelerators, Presses Universitaires de France, Paris, (1962), p65.
4. Tesch, K.: Radiat. Protec. Dosim., 11, 165 (1985).
5. Takada, H., Yoshizawa, N., Kosako, K. and Ishibashi, K.: An Upgraded Version of the Nucleon Meson Transport Code: NMTC/JAERI97, JAERI-Data/Code 98-005 (1998).
6. Mokhov, N.V.: The MARS Code System User's Guide, Version 13(95) Reference Manual, Fermilab-FN-628, 1995
7. Briesmeister, J. F., (ed.): MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4A, LA-12625 (1993).

8. Ban, S.: Nucl. Instrum. Methods, 174, 271 (1980).
9. Alsmiller, R. G., Barish, Jr. and J. M.: Neutron-Photon Multigroup Cross Sections for Neutron Energies < 400 MeV, ORNL/TM-7818 (1981).
10. Engle, W.A. Jr.: "A User's Manual for ANISN, A One-dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering", USAEC Report K-1693 (1967).
11. Rhodes, W. A. and Mynatt, F.A.: "DOT-III: A Two Dimensional Discrete Ordinate Transport Code," ORNL-TM-4280, Oak Ridge National Laboratory (1973).
12. Johnson, J.: Private communications.
13. Tesch, K.: Particle Accel., 12, 169 (1982).
14. Uwamino, Y. and Nakamura, T. and Ohokubo, T.: Med. Phys., 13, 374 (1986).
15. 中村尚司、上養義朋: Radioisotopes, 35(2), 51 (1989).
16. 林克己他: 「ダクトストリーミング簡易計算コード DUCT-II 及びスカイシャイン簡易計算コード SHINE-II の開発」、JAERI-M 91-013 (1991).
17. Stapleton, G. B. and O'Brien, K. and Thomas, R.: Particle Accel., 44(1), 1 (1994).
18. Takada, H. and Kosako, K.: Development of the DCHAIN-SP Code for Analyzing Decay and Build-up Characteristics of Spallation Products, JAERI-Data/Code 99-008 (1999).
19. Mokhov, N. V.: Private communications.
20. Alcouffe, R. E., et al.: "Users Guide for TWODANT: A Code Package for Two-Dimensional, Diffusion-Accelerated, Neutral-Particle Transport," LA-100049-M (1990).
21. Vondy, D. R. and Cunningham, G. W.: "Exposure Calculation Code Module for Reactor Core Analysis: BURNER," ORNL-5180 (1979).
22. Sasa, T., et al.: "Accelerator-driven Transmutation Reactor Analysis Code System- ATRAS -," JAERI-Data/Code 99-007 (1999).
23. Croff, A. G.: "ORIGEN2 - A Revised and Updated Version of the Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code". ORNL-5621, 1980.
24. 岡嶋成晃他: 「ナトリウム冷却金属燃料高速炉用炉心過渡挙動解析コード EXCURS の改造と解析例」, JAERI-M 92-031(1992).
25. Rudstam, G.: S. Naturforschung, 21a, 1027 (1966).
26. Summerer, K., et al.: Phys. Rev. C42, 2546 (1990).
27. Silberberg, R., et al.: Astro. J. Suppl. Ser. 58, 873(1985).
28. Brown, K. L., Iselin, Ch. and Carey, D. C.: DECAY TURTLE, CERN 74-2 (1974).
29. Wang, C. L.: Phys. Rev. Lett., 25, 1068 (1970).
30. Taylor, E. F., et al.: Phys. Rev. D14, 1217 (1976).
31. Yamamoto, A., et al.: Nucl. Instr. and Methods, 203, 35 (1982).
32. Thomas, R. H. and Stevenson, G. R.: "Radiological Safety Aspects of the Operation of Proton Accelerators," IAEA TR-283 (1988).
33. Sullivan, A.: Nucl. Instr. and Methods, 283, 197 (1985).