

月面可搬型炉SPECTRA-Lの概念検討(Ⅱ)

宇宙空間における線量当量に関する考え方

1991年3月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

月面可搬型炉SPECTRA-Lの概念検討(Ⅱ)

宇宙空間における線量当量に関する考え方

野村紀男* 羽賀一男** 大坪 章**

要 旨

可搬型炉研究の一環として概念検討を進めている月面上原子動力プラントSPECTRA-Lの遮蔽構造を定める上から、月面上でも地上と同様に放射線に対する何らかの限度を設定する必要がある。しかしながら、月面上あるいは宇宙空間（以後月面上と言う）で放射性物質等を取扱う場合、銀河や太陽から放出される宇宙線の影響が大きいため、地上の線量当量限度をそのまま適用することはできない。そこで、本書では、地上の外部放射線による線量当量限度の値を踏まえた上で、月面上の線量当量限度について検討した。

本検討から、月面で作業する作業員の生涯の線量当量限度案として2.0Svを、また1年間の線量当量限度案として、ICRPの1990年勧告で示された事故の制御や緊急の救済措置における線量当量限度である0.5Svよりも低い0.4Sv/yを提案する。また、1カ月の線量当量限度は1年間の限度を計画的に守るため0.04Svとすることが妥当であろう。原子炉に関しては、原子炉からの影響が、作業員が原子炉へ常時接近することが可能な位置で年線量当量限度の10%以下、すなわち40mSv/yにおさえることが望ましいとした。

SPECTRA-L運転中の月面の土壌であるレゴリスの遮蔽効果の1次元解析によると、径方向で約11.5m離れば原子炉からの影響はないと評価された。また本検討の中で、①稼動中は作業員が原子炉施設へ近づかなくても管理が可能なシステムとすること、②居住区周辺は磁気を利用した放射線シールドや作業性の良い防護服の素材の開発を行うことにより被ばく防止を図ることを提案した。居住区域の線量当量限度は、十分な遮蔽設計を行い無用な被ばくをできる限り低減するための措置を施す必要がある。また、地下立地（ジオフロント）を採用し、原子炉施設付近で作業する場合も、月面上に出ることを極力避けるため、地下道を利用して目的の建家へ向かう設計が良い。

* 大洗工学センター 安全管理部 放射線管理課

** 大洗工学センター 技術開発部 フロンティア技術開発室

Conceptual Design Study of Transportable Reactor SPECTRA-L
for Lunar Base (II)

Study on the Dose-Equivalent Limit in Space

Norio NOMURA*, Kazuo HAGA**, Akira OTSUBO**

ABSTRACT

Conceptual design of the SPECTRA-L power plant for lunar base is being performed as one of the transportable reactor study. It is necessary to establish an acceptable limit of dose equivalent in space as well as that on the earth so as to design the shield to the reactor. Because the natural radiation dose in space is higher than that on the earth, terrestrial dose equivalent limit can not be directly applied. In this report, we examined the dose equivalent limit on the moon based on the terrestrial one, then analyzed the shielding effect of lunar soil (regolith) which is expected as shielding material in this plant.

The study led us to propose some limits on the acceptable radiation in the human activity in space, that is 2.0 Sv in life and 0.4 Sv/year, consequently 0.04 Sv/month. The yearly limit is less than 0.5 Sv which is admitted in the ICRP Publication 60 to emergency situation. A limit of 40 mSv/year is suggested to the radiation from nuclear reactor at the place where stuffs of lunar base is easily accessible. The suggested value is 10 % of the proposed yearly limit to the natural radiation in space. A one-dimensional analysis on the shielding effect of the regolith covering SPECTRA-L showed that the neutron dose equivalent rate of the reactor is attenuated to the background level of space at a point about 10 m apart from the reactor center and to that on the earth at about 12 m.

Lastly, it is emphasized that the exposure to radiation should be reduced by the following methods.

- (1) Automatic operating system of the plant.
- (2) Development of materials for easy-working protection clothes and radiation shield using magnetism in the living area.
- (3) Minimum exposure to radiation, especially in the living area, following the spirit of ALARA.
- (4) Underground base and underground transport routes to other facilities.

* : Radiation Control Section, Health and Safety Division,
Oarai Engineering Center, PNC

** : Frontier Technology Development Section, Technology Development Division,
Oarai Engineering Center, PNC

目 次

第1章	はじめに	1
第2章	自然界に存在する放射線	2
2.1	地上における自然放射線	2
2.2	宇宙空間における自然放射線	4
第3章	原子力施設で定められている線量当量限度値及びその考え方	10
第4章	各国における宇宙空間の線量当量限度	12
4.1	ソ連における線量当量限度	12
4.2	米国における線量当量限度	13
4.3	21世紀の宇宙活動に備えて米国で検討されている案	13
第5章	宇宙空間における線量当量限度についての考察	18
第6章	月面原子炉周辺の放射線	19
6.1	宇宙線の影響	19
6.2	原子炉からの影響に対する基準案	19
6.3	SPECTRALからの影響に関する評価	19
第7章	おわりに	29
謝 辞		31
参考文献		32

表 一 覧

表 3 - 1	従事者及び一般公衆の線量当量限度 I C R P 勧告値	11
表 4 - 1	標準放射線レベルによる飛行時間別の線量当量限度	12
表 4 - 2	アポロ計画に用いられた暫定的放射線線量限度	13
表 4 - 3	アポロ計画における宇宙飛行士の被ばく実績	14
表 4 - 4	スペースシャトルに搭乗した宇宙飛行士に関する被ばく実績	15
表 4 - 5	宇宙飛行士、宇宙作業者に対する線量当量限度（年齢、性別）	16
表 4 - 6	宇宙飛行士、宇宙作業者に対する線量当量限度（部位別）	16
表 6 - 1	炉心における中性子及び γ 線の線量当量率	20
表 6 - 2	アポロ計画で採取した月面土サンプルの成分	21
表 6 - 3	通常時と乱した状態の時のmare soil 1 cc当たりの原子個数	22
表 6 - 4	1次元解析によるレゴリスの遮蔽効果	22
表 7 - 1	線量当量限度一覧表	29

図 一 覧

図 2 - 1	太陽活動が不活発な時の宇宙線（プロトン及び荷電粒子） エネルギースペクトル	6
図 2 - 2	太陽活動のが活発な時の太陽風によるプロトンのエネルギー スペクトル	7
図 2 - 3	GCRとSPEの各エネルギーにおけるフラックス	8
図 2 - 4	ウラン及びトリウム放射性壊変系列	9
図 6 - 1	月面におけるSPECTRAL設置図	24
図 6 - 2	SPECTRALにおける中性子及び γ 線の線量当量率 軸方向分布	25
図 6 - 3	SPECTRAL設置のための掘削範囲	26
図 6 - 4	2MW定格運転時の原子炉周囲（径方向）の線量当量率	27
図 6 - 5	SPECTRAL運転中における地表面の中性子軸方向減衰曲線	28

第1章 はじめに

可搬型炉研究の一環として概念検討を進めている月面上原子動力プラントSPECTRA-L⁽¹⁾の遮蔽構造を定める上から、月面上でも地上と同様に放射線に対する何らかの限度を設定する必要がある。地球上で放射性物質等を取扱う場合、作業員及び一般住民に対して影響を及ぼさない様にするため、各国ではICRPの精神を踏まえながら取扱いに関する一定の基準を設けている。しかし、月面上あるいは宇宙空間（以後月面上と言う）では銀河や太陽から放出される宇宙線により放射線のレベルが格段に高く、また月面上で活動するのは特別な任務を持った限られた人々であることから、このような特殊な環境では地上とは異なった線量当量限度を用いる必要がある。そのため、地上の外部放射線による線量当量限度の値を踏まえた上で、月面上の線量当量限度について検討した。また検討に基づきSPECTRA-Lで遮蔽として採用しているレゴリス（月面の砂状の土）の遮蔽効果について評価した。

第2章 自然界に存在する放射線

地上における外部放射線の管理は、放射性物質を取扱う時の被ばくを管理するものであり、自然放射線や医療による被ばくの管理には適応されていない。しかし、月面上の自然放射線は地上に比べてはるかに高く、それに対する考慮が重要となる。本章では、自然界に存在する放射線について述べ、地上と月面上との違いを明らかにする。

2.1 地上における自然放射線

自然界には様々な所に放射線源が存在している⁽²⁾。代表的な線源は、宇宙、大地、大気、食品等といったもので、自然界全てが線源であると言っても過言ではない。この線源は、一定濃度で分布しておらず、線源を含んでいる物質別、地域別でかなり異なっている。例えば、大地からの放射線を考えると、関東では年間約0.3mSv (30mrem) であるが、関西では約0.6mSvと2倍ほど多い⁽³⁾。また、インドのKeralaやMadras地方では約10万人が年間約13mSvの放射線を受けながら生活している⁽⁴⁾。これまで、地上の人間が1年の間に受ける平均の自然放射線の量は、宇宙線から約0.35mSv、食物から約0.35mSv、大地から約0.4mSv、合計約1.1mSvとしてきたが、最近では、実効線量当量の考え方とラドン (^{222}Rn)、トロン (^{220}Rn もしくはTn) からの被ばくを考慮して年間2.1mSvと改められた。(1988年国連科学委員会報告では、自然放射線から受ける線量当量を2.4mSvとしている⁽³⁾。)

(a) 宇宙線

宇宙線は、宇宙から地球に流れてくる銀河系由来の宇宙線 (Galactic Cosmic Rays: GCR) と11年サイクルの太陽爆発高調期 (太陽フレア) に増加する太陽線 (Solar Particle Events: SPE) から成り立っている。これらの宇宙線は高エネルギーの光子 (γ 線) と光速に近い速度を持った粒子の混合である。GCRは98%がプロトンや重荷電粒子の陽イオンでプロトンが87%を占め、ヘリウムイオンが12%、残りの1%が他の重荷電粒子 (炭素や鉄)、2%が電子や陽電子である。これらのエネルギーは、数MeV \sim 10⁸MeVでその寿命 (運動エネルギーが0となり、核が安定するまで) は約1700年と推定されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。図2-1に太陽活動が不活発な時の宇宙線のエネル

ギースペクトルを、図2-2にSPEによるプロトンのエネルギースペクトルを示す。またGCRとSPEの比較のために、GCRについては太陽活動が活発な時と付活発な時の各エネルギーにおける1週間のフラックスとSPEについては、太陽フレアが発生した後の1972年8月4日から7日までの各エネルギーにおけるフラックスを図2-4に示す⁽⁶⁾。この図から、太陽活動によってGCRは若干変動するが同じ傾向を示し、SPEは10MeVに極大値を持った分布を示している。このことから、GCRはSPEに比べて高エネルギーを発生させているものの低エネルギー側の強度は格段に低く、相対的に見てSPEの方が影響が高いと考えられる。宇宙での γ 線は、50MeVを越すエネルギーを持っている。しかし、SPEによる γ 線は弱く、プロトン等を含む宇宙線の全放射量のわずか10億分の1に過ぎない⁽⁷⁾。またGCRによるX線は線源から距離が遠くあまり重要ではない⁽⁸⁾。

GCRやSPEといった宇宙から飛来した荷電粒子（プロトン及びヘリウム、炭素、鉄等のイオン）は、太陽紫外線に対する電離層の作用と同様に、地球を取り巻く磁場によって捕捉され、地球の磁気モーメントによって大部分が地磁気の極端に弱い地球の両極に衝突するように引き寄せられる。この地磁気帯をヴァンアレン帯（高さ3600kmと2000kmに極大値があり地球全体を覆っている。）と呼んでいる。この地磁気に捉えられた粒子は、宇宙飛行士の被ばくに大きく寄与する⁽⁹⁾。宇宙線が地上に降り注ぐ場合、大気によってシールドされるが、大気との相互作用（シャワー効果）により中性子、中間子、 γ 線を生成する。地上に到達する粒子は、 α 線では0.05%に過ぎず、中間子が80%、電子が20%である⁽²⁾。

(b) 大地からの放射線

大地からの放射線のうち代表的な線源は、トリウム (^{232}Th)、ウラン (^{238}U) 及び ^{40}K である。Th、Uは局所的に高濃度の地域が存在するが、世界の土壤中にそれぞれ平均6ppm (Th)、1ppm (U) が含まれている⁽¹⁰⁾。この2つの核種は自然崩壊し、いくつかの放射性物質を生成する（図2-3参照）。その中でも、ラジウム (^{226}Ra 、 ^{228}Ra) が最も代表的で、ラジウムの娘核種であるラドン（ガス状： ^{220}Rn 、 ^{222}Rn ）やラドンの娘核種 (^{218}Po 、 ^{214}Bi 、 ^{210}Pb 等) を生成しており、現在ラドンによる被ばくが注目を集めている。農作物生産地では、肥料に含まれている ^{40}K が増加してい

る⁽¹¹⁾。カリウムは、生物が生存する上でも必要不可欠な元素であり、人体あるいは、食品等にも多く含まれている。

(c) 大気からの放射線

大気中の放射性核種の発生は先に述べた宇宙線と大気との反応生成物、核爆発の残存破片、土壌中、原子力、及び化石燃料発電所からの放出物に起因する。

(d) 食品等からの放射線

食品等からの放射線は、 ^{40}K に代表される自然放射性核種及び核爆発の残存破片、原子力施設から放出、漏洩した人工放射性物質に起因する。現在までに問題となったものは人工放射性物質であり、核爆発の残存破片や予期せぬ事故等で漏洩した放射性物質が地上に降り注ぎ、食物に吸収されたケースが多い。

2.2 宇宙空間における自然放射線

月面上は、先に述べた通り地上とは正反対の外部放射線環境下にある。すなわち、月面上では放射線の量が多過ぎて、意図して放射性物質を取り扱わなくても無防備では死に至る可能性が高い。従って、原子炉等の放射線防護の以前に、自然環境の放射線管理をまず考慮しなければならない。

宇宙空間の放射線レベルは、宇宙線により通常年間 $0.2\text{Sv}\sim 0.5\text{Sv}$ であるが、断続的に起きる太陽フレア（太陽表面で非常に明るい羊斑の出現にともなって磁気波や荷電粒子（SPE）が増大する現象）によって放出されるSPEは、数日間で 10Sv という高い値を示す⁽¹²⁾⁽¹³⁾。SPEの構成はGCRと同様にほとんどがプロトンで、その他にヘリウムや重荷電粒子が含まれている。SPEによって発生する放射線は、GCRと比べてフルエンスは高いもののエネルギーは数MeV程度から数百MeV程度と低い。従って遮蔽を考える場合、遮蔽物質との2次効果（遮蔽物との相互作用による2次放射線の発生）はそれほど考慮しなくても良い。この他、実効線質係数が大きい荷電粒子がほとんどであることから、放射線場の性質・強度の変動が激しい。

月面上では、地球の様に磁気帯（ヴァンアレン帯）といった荷電粒子の侵入を防止する効果はほとんどないため⁽⁹⁾、先に述べた宇宙線がそのまま降り注ぐことが考えられる。また、希薄な気体や月面上のレゴリスといった物質との相互作用によって中性子、

中間子、 γ 線を生成する（シャワー効果）可能性もある。この他、宇宙線は通常地上で取り扱われるエネルギーの低く、飛程が短い α 線や重荷電粒子とは異なり、エネルギーが高いため、簡単で薄い遮蔽では防護が困難である。この様に月面上の外部放射線は、地上での外部放射線と比較して非常に異なった特性を持つと言える。

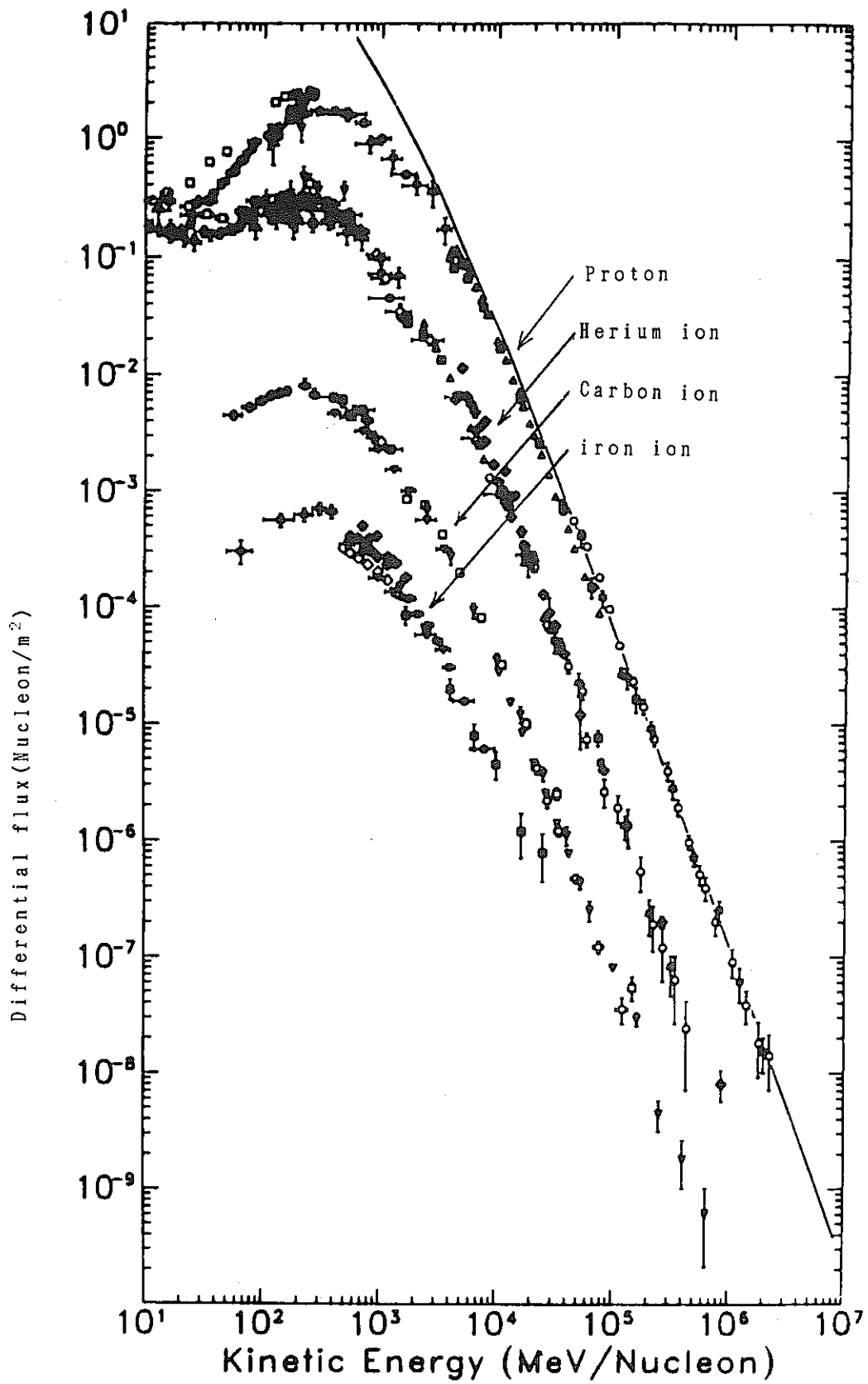


図2-1 太陽活動が不活発な時の宇宙線（プロトン及び荷電粒子）エネルギースペクトル

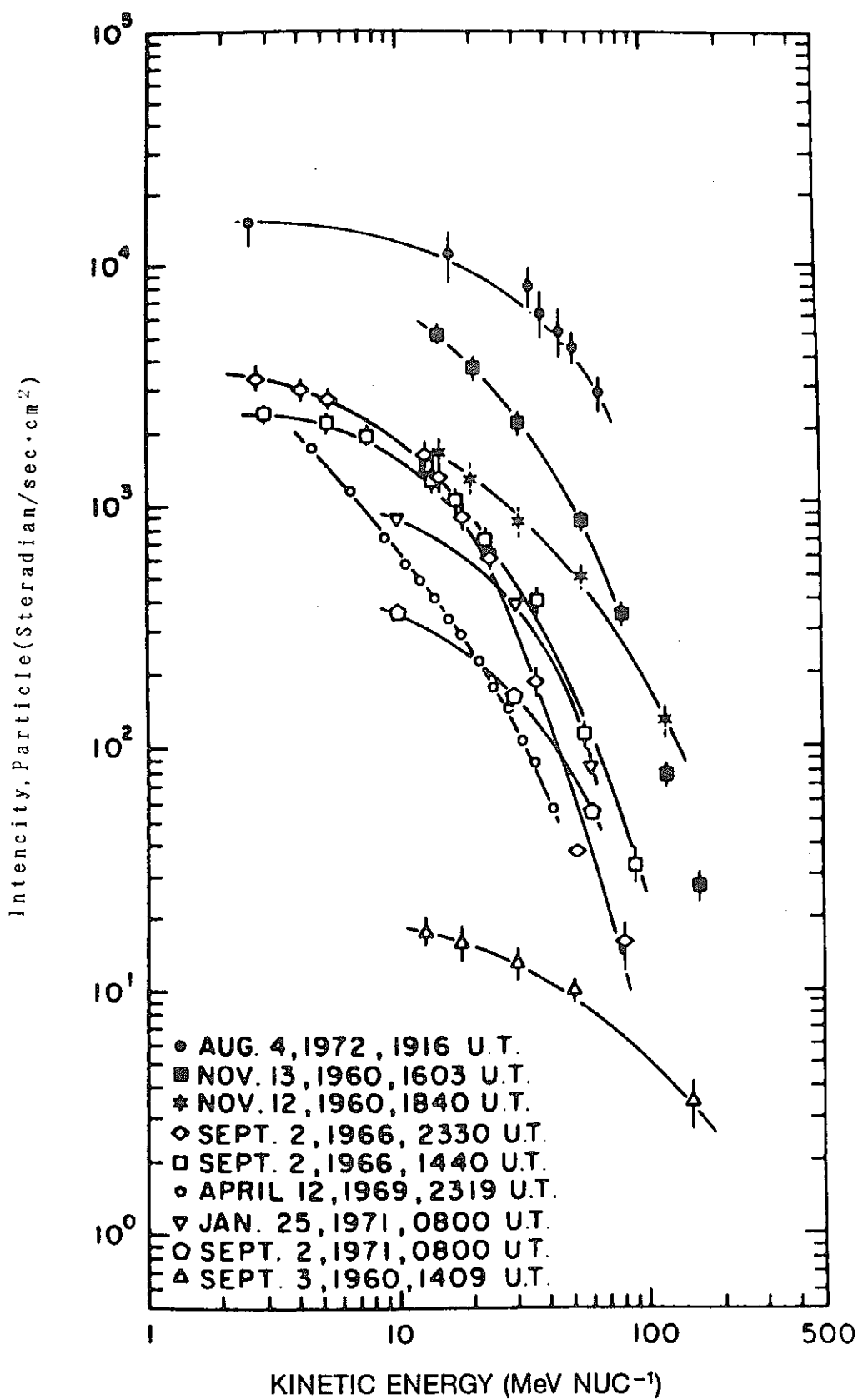


図 2 - 2 太陽活動が活発な時の太陽風によるプロトンのエネルギースペクトル

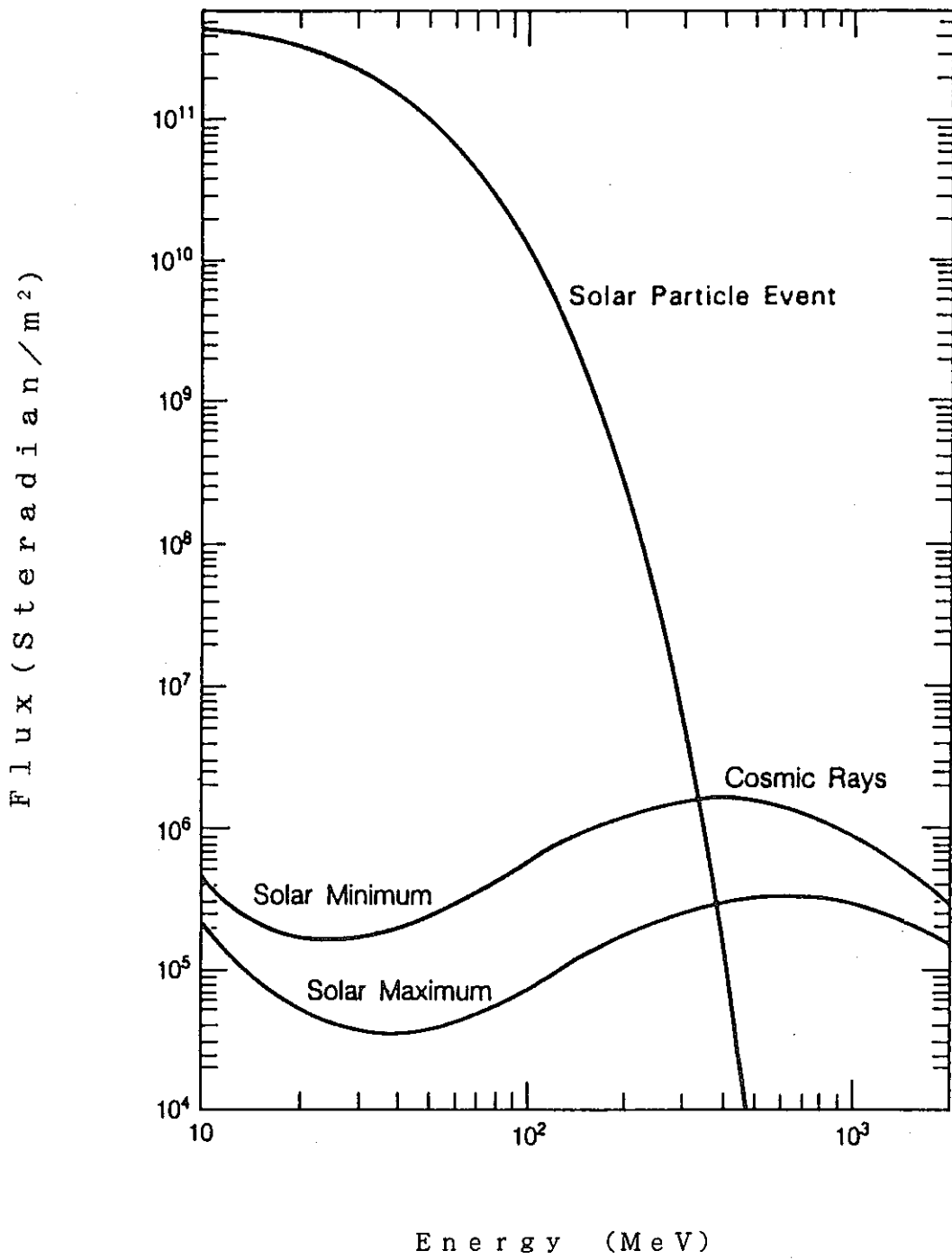
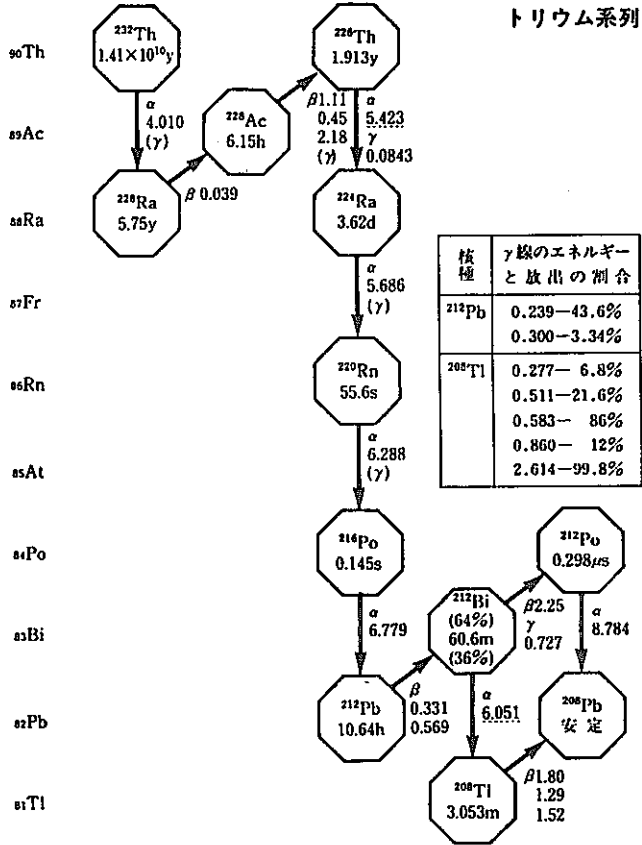


図 2-3 GCRとSPEの各エネルギーにおけるフラックス

放射性壊変系列

主として E. Browne and R. B. Firestone :
 "Table of Radioactive Isotopes" (ed. by
 V. S. Shirley), John Wiley & Sons, Inc.,
 New York (1986) による



ウラン系列

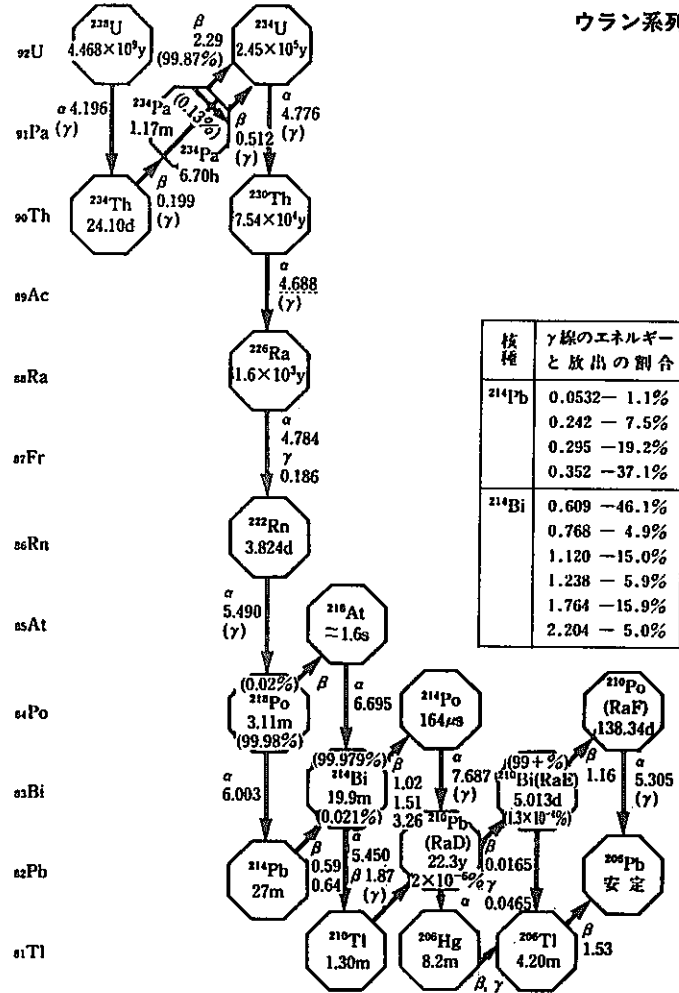


図 2-4 ウラン及びトリウムの放射性壊変系列

第3章 原子力施設で定められている線量当量限度値 及びその考え方

現在の線量当量限度の思想は、放射性物質を使用あるいは取扱う場合のものであり、医療や自然界に存在する放射性物質に関する項は除かれている。（最近の傾向では、医療被ばくや、自然放射性核種であるラジウムに起因する ^{220}Rn 、 ^{222}Rn による被ばくが注目されつつある。）

放射線防護に関する方向付けは、ICRP（国際放射線防護委員会）で行われている。ここでは、各国から放射線防護に関する専門家が集まり、部門ごとにタスクグループを結成し、定期的に報告（PUBLICATION）を実施している。多くの基礎データは、広島、長崎に投下された原子爆弾による影響や動物実験等によって供給されている。この他、国連や各国にも同様の機関があり、様々な情報を提供している。

放射性物質を取扱う国では、ICRPの報告を基に法律によって取扱いや使用に規制を設けている。ICRPは、ALARA（As Low As Reasonable Achievable）⁽¹⁴⁾の基本精神に則り、防護の最適化を図るべきであると述べている。これに伴い、放射線業務従事者（以後従事者と言う）及び一般公衆に対し守るべき線量当量限度を勧告している。この中では、大きく分けて外部放射線に起因する場合と、放射性物質を吸入、摂取した場合が書かれているが、ここでは、月面上での線量当量限度を考察するため、前者について記述する。

従事者及び一般公衆の線量当量限度について、ICRP 1990年勧告（ICRP Publication 60）⁽¹⁵⁾では表3-1の線量限度勧告値を示している。

表 3 - 1 従事者及び一般公衆の線量当量限度 I C R P 勧告値^{a)}

Application	Dose limit	
	Occupational	Public
Effective dose ^{c)}	20mSv per year averaged over defined periods of 5 years ^{b)}	1mSv per year
Annual equivalent dose ^{d)} in the lens of the eye	150mSv	15mSv
the skin	500mSv	50mSv
the hands and feet	500mSv	-

a) The limits apply to the sum of the relevant doses from external exposure in the specified period and the 50-year committed dose (to age 70 years for children) from intakes in the same period.

b) With the further provision that the effective dose should not exceed 50mSv in any single year. Additional restrictions apply to effective doses in single year and to the occupational exposure of pregnant women.

c) 実効線量当量

放射線を受けた場合、臓器や組織によって確率的影響（リスク）が異なる。この場合、健康損害を考える上で、人体における全リスクが必要となってくる。そこで、各臓器または組織をTとした時、各々の組織荷重係数 W_T を定め、それらが受ける平均線量当量を H_T とすると、実効線量当量 H_E は次式で表される。

$$H_E = \sum W_T H_T$$

d) 局部における線量当量

放射線を受けた場合、受けた箇所に直接影響が現れる部分の線量当量限度。

実効線量当量とは、考え方が異なるため関連性はない。

第4章 各国における宇宙空間の線量当量限度⁽¹⁶⁾

月面上においても地上における従事者の線量当量限度を適用することが望ましいが、環境中の放射線が高すぎるため、この限度を用いると作業することが不可能となってしまう。従って、月面上における線量当量限度は、地上の限度よりも高く設定しなければならない。現在のところ有人宇宙船を打ち上げている国はソ連と米国であり、この両国の線量当量限度について概要を記す。

4.1 ソ連における線量当量限度⁽¹⁷⁾

ソ連では、宇宙飛行士の線量当量限度として1975年に暫定基準（TRSS-75）を定めており、ここでは遺伝障害を除いたリスク評価を基本に設定している。内容は1977年以前のICRP勧告同様決定臓器の概念が使用されており、人体5cmの深部にあたるとした骨髄、皮膚それに水晶体が採用されている。防護基準としての標準放射線レベルは、飛行時間別に決定されており、表4-1の様になっている。

表4-1 標準放射線レベルによる飛行時間別の線量当量限度

飛行時間	線量当量限度 (Sv)
1カ月	0.5
3カ月	0.8
6カ月	1.1
12カ月	1.5

これらの値は、我が国の原子力施設の従事者の緊急時の被ばくの線量当量限度0.1Sv（ICRPでは0.5Sv）や通常の線量当量限度である20mSv/yを大きく超える。ソ連では宇宙飛行士の被ばくの線量当量限度の他に、放射線防護システムの信頼度に対する厳しい基準を設けている。この基準は“飛行に際して標準放射線レベルを超えない確率”のことであり、宇宙船の遮蔽設計に際しては信頼度90%で0.99を下回ってはならないとしている。多くの宇宙船では、太陽フレアによる放射線バーストに襲われた時、乗組員

は作業室から遮蔽の強化された放射線待避室へ移動することになっている。

4.2 米国における線量当量限度⁽¹⁸⁾

米国では、宇宙飛行士に対する確立した線量限度*は存在しないが、アポロ計画においては30～60日の飛行を前提に表4-2に示す線量限度が採用された。

表4-2 アポロ計画に用いられた暫定的放射線線量限度

組 織	深 度 (mm)	POD* (rad/d)	MOD* (rad/d)
皮膚	0.1	2.5	5.0
眼の水晶体	3.0	1.25	2.5
骨髄	5.0	0.6	1.0

*ここでは、旧単位による表現を行っているため、線量当量の概念は含まれていない。

POD：計画作業線量（超えた時には、飛行計画を変更しなければならない線量）

MOD：最大作業線量（乗組員に重大な障害及び晩発効果をもたらされるのを防止するための線量限度）

また、表4-3にアポロ計画における被ばく実績を、表4-4にスペースシャトルにおける被ばく実績を示す⁽⁶⁾。

4.3 21世紀の宇宙活動に備えて米国で検討されている案⁽¹⁹⁾

NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurement) は、今後増大するであろう宇宙空間での特殊作業における被ばくの線量当量について報告している。

ここで示された宇宙線等放射線による線量当量限度を表4-5及び表4-6に示す。

表 4-3 アポロ計画における宇宙飛行士の被ばく実績

STS Mission Number ^a	Spacecraft	Launch Date	Mission Duration (days)	Alt. (km)	Inc. (°)	Number of Crew	Range of Crew doses (mGy) ^b	Average mission Crew dose (mGy) ^b	Ave. daily crew Dose (mGy per day)
1	Columbia	04-12-81	2.25	269	40	2	not available	0.089 ^c	0.040
2	Columbia	11-12-81	2.42	254	38	2	0.06-0.11	0.85±0.023 ^d	0.036
3	Columbia	03-22-82	8.12	280	38	2	0.50-0.52	0.509±0.007 ^d	0.063
4	Columbia	06-27-82	7.04	297	28.5	2	0.44-0.45	0.444±0.002 ^d	0.063
5	Columbia	11-11-82	5.08	284	28.5	4	0.27-0.29	0.278±0.012 ^d	0.056
6	Challenger	04-04-83	5.00	293	28.5	4	0.24-0.27	0.25±0.02	0.050
7	Challenger	06-18-83	5.96	297	28.5	5	0.43-0.46	0.44±0.01	0.074
8	Challenger	08-30-83	6.04	297 (max)	28.5	5	0.38-0.41	0.39±0.01	0.065
41A	Columbia	11-28-83	10.33	250	57	6	1.19-1.41	1.25±0.02	0.121
41B	Challenger	02-03-84	7.96	297	28.5	5	0.45-0.49	0.48±0.01	0.060
41C	Challenger	04-06-84	7.00	528 (max)	28.5	5	4.41-6.22	5.19±0.05	0.741
41D	Discovery	08-30-84	6.04	297	28.5	6	0.51-0.53	0.52±0.01	0.086
41G	Challenger	10-05-84	8.21	352 (max)	57	7	0.84-0.92	0.88±0.01	0.107
51A	Discovery	11-08-84	8.00	297 - 352	28.5	5	0.88-1.59	1.15±0.02	0.144
51C	Discovery	01-24-85	3.08	297 - 334	28.5	5	0.35-0.41	0.39±0.01	0.126
51D	Discovery	04-12-85	7.00	297 - 454	28.5	7	3.03-4.72	3.81±0.05	0.544
51B	Challenger	04-29-85	6.92	352	57	7	1.27-1.60	1.48±0.02	0.214
51G	Discovery	06-17-85	7.08	380 (max)	28.5	7	1.05-1.52	1.30±0.01	0.184
51F	Challenger	07-29-85	7.96	322 - 304	49.5	7	1.12-1.67	1.38±0.02	0.173
51I	Discovery	08-27-85	8.00	378 (max)	28.5	5	0.99-1.20	1.06±0.01	0.133
51J	Atlantis	10-03-85	3.96	510 (max)	28.5	5	3.29-5.13	4.26	1.078
61A	Columbia	10-30-85	7.04	324	57	8	1.12-1.39	1.21	0.172
61B	Atlantis	11-26-85	6.88	380	28.5	7	1.25-1.71	1.43	0.208
61C	Columbia	01-12-86	6.08	324	28.5	7	0.65-0.75	0.69	0.113

^aAverage crew doses for STS Mission 1 through 5 supplied by University of San Francisco; Mission STS-6 through 61C supplied by NASA-Johnson Space Center.

^b1 mGy = 100 mrad.

^cFrom a single active dosimeter.

^dStated uncertainty represents measurement precision, one standard deviation of the mean, rather than absolute accuracy. Previous measurements of absolute accuracy suggest that the given values are accurate to within 6 to 8 percent.

表 4-4 スペースシャトルに搭乗した宇宙飛行士に関する被ばく実績

Flight	Duration (days)	Inclination (deg)	Apogee-perigee (km)	Mission dose (mGy) ^b	Daily dose (mGy)
Gemini 4	4.05	32.5	296-166	0.46	0.11
Gemini 6	1.05	28.9	311-283	0.25	0.23
Apollo 7	10.83	31.6	229-306	1.60	0.15
Apollo 8	6.12		lunar orbital flight	1.60	0.26
Apollo 9	10.04	32.6	197-249	2.00	0.20
Apollo 10	8.00		lunar orbital flight	4.80	0.60
Apollo 11	8.08		lunar orbital flight	1.80	0.22
Apollo 12	10.19		lunar orbital flight	5.80	0.57
Apollo 13	5.95		lunar orbital flight	2.40	0.40
Apollo 14	9.00		lunar orbital flight	11.40	1.27
Apollo 15	12.29		lunar orbital flight	3.00	0.24
Apollo 16	10.08		lunar orbital flight	5.10	0.46
Apollo 17	12.58		lunar orbital flight	5.50	0.44
Skylab 2 ^c	28	50	alt = 435	15.96	0.54 ± 0.3
Skylab 3 ^c	59	50	alt = 435	38.35	0.65 ± 0.5
Skylab 4 ^c	90	50	alt = 435	77.40	0.86 ± 0.9
ASTP ^d	9	50	alt = 220	1.06	0.12

^aDoses quoted for the Apollo flights are skin doses. The doses to the blood-forming organs are approximately 40 percent lower than the values measured at the body surface.

^b1 mGy = 100 mrad.

^cMean thermoluminescent dosimeter (TLD) doses from crew dosimeters.

^dApollo-Soyuz Test Project.

表 4 - 5 宇宙飛行士、宇宙作業者に対する線量当量限度（年齢、性別）

単位：S v

性別 \ 年齢	25	35	45	55
男子	1.5	2.5	3.25	4.0
女子	1.0	1.75	2.5	3.0

表 4 - 6 宇宙飛行士、宇宙作業者に対する線量当量限度（部位別）

滞在期間	深部線量(5cm) (S v)	眼(0.3cm) (S v)	皮膚(0.01cm) (S v)
30日	0.25	1.0	1.5
年間	0.50	2.0	3.0
生涯	1~4	4.0	6.0

表 4 - 6 中の生涯線量当量の 1 ~ 4 Sv は、次の式から導出されている。

男子： $2.00 + 0.075 (\text{年齢} - 30)$ [Sv]

女子： $2.00 + 0.075 (\text{年齢} - 38)$ [Sv]

宇宙飛行士に対する放射線の線量当量限度が地上における限度と比較してかなり高く設定されている理由には、以下の 4 点が挙げられている。

- (i) 放射線は、宇宙飛行の成功に危険をもたらす恐れのある多数の認識され受容されている潜在的危険の 1 つに過ぎない。
- (ii) 個々の飛行士は特殊技術と行動能力について入念に選択されている。職業被ばくの大きな集団に対して設定された現行の放射線に関する線量当量限度は、この小数の専門技術者であるグループがその目的を達成する能力を不当に制限するものである。
- (iii) 宇宙におけるある種の放射線による危険のパラメータを精密に予測することはできない。従って、適切な防護対策はいつでも得られるとは限らないばかりか、場合によってはあり得ない場合がある。放射線の遮蔽には、どんな物質を使用しても宇宙船の重量を増加させるため、遮蔽によって達せられる危険の低減は、その重量を他の目的

に使用する場合とのバランスを考慮しなければならない。

- (iv) 宇宙飛行は期間も放射線による被ばくも様々であるため、放射線による危険の重要性と確率は他の危険と比較した上でそれぞれの飛行について考慮されるべきである。この比較には危険対利益のフィロソフィが最も適しており、このフィロソフィは放射線による危険の評価に対して特に有効である。

第5章 宇宙空間における線量当量限度についての考察

これまでに地球上や月面上における自然放射線の状況や、地上の線量当量限度や月面上における作業員の線量当量限度を述べてきた。ここではこれらの情報から、月面作業時と居住区域の線量当量限度案について考察する。

1) 生涯及び1年間の線量当量限度案

現在の法令では、地上における放射線業務従事者の線量当量限度を $50\text{mSv}/\text{y}$ として
いることから、生涯月面で業務すると想定して

$$50 (\text{mSv}/\text{y}) \times 40 (\text{y}) = 2.0\text{Sv}/\text{生涯}$$

$2.0\text{Sv}/\text{生涯}$ を線量当量限度とすることが妥当であろう。

1年間の線量当量限度案としては、ICRPの1990年勧告で示された事故の制御や緊急の救済措置における線量当量限度である 0.5Sv よりも低い $0.4\text{Sv}/\text{y}$ を提案する。また、1カ月の線量当量限度は1年間の限度を計画的に守るため 0.04Sv とすることが妥当であろう。

2) 居住区域（居室及び作業室）

居住区域の線量当量は、十分な遮蔽設計を行い、無用な被ばくをできる限り低減するための措置を施す必要がある。また、地下立地（ジオフロント）を採用し、原子炉施設付近で作業する場合も、月面上に出ることを極力避けるため、地下道を利用して目的の建家へ向かう設計が望ましい。

第6章 月面原子炉周辺の放射線

原子炉周辺の放射線は、先に述べた宇宙線と運転中の原子炉から放出される放射線である。地上では自然放射線の影響が低いため、原子炉からの影響を自然環境に対し影響がないレベルで法律等により規制し、さらに可能な限り低くしている。しかしながら、月面上では、自然放射線に相当する宇宙線が人体に影響を与えるほど高く、原子炉からの影響を低く抑えることが意味をなさない。従って、宇宙線による影響を考慮した上で、原子炉からの影響を定める必要がある。

6.1 宇宙線の影響

宇宙線は人体に多大な影響を与えることが予想されるため、まずこれらの放射線に対する防護対策を立てなければならない。宇宙線のほとんどはプロトンであるため、そのほとんどは薄い防護壁で遮蔽することが可能である。しかしながら、そのエネルギーは高く、遮蔽物との相互作用で中性子や β 線、 γ 線といった2次放射線を放出する可能性がある。2次放射線の放出率は不明な点が多いため、宇宙線による影響を防護する上で物質との相互関係を把握しなければならない。

6.2 原子炉からの影響に対する基準案

原子力施設自身の遮蔽設計は、宇宙空間自体が大きな放射線場であるため、地上の場合よりも簡素化することが許容され、また原子炉からの影響を制御するにしても地球上の様な基準値は必要ない。しかしながら、原子炉運転中の放射線は遮蔽次第で宇宙線に匹敵する量が放出される。従って、運転中に放出される放射線を常時被ばくするとした場合の線量当量限度は、年線量当量限度の10%以下、すなわち40mSv/yに抑えるのが妥当であろう。また、稼働中は、作業者が原子炉施設へ近づかなくても管理が可能なシステムにすることが必要である。

6.3 SPECTRALからの影響に関する評価

月面設置を前提としている原子炉は、月面への打ち上げを容易とするため、重量を抑

え、かつパッケージタイプである。出力が300kWのもの（SPECTRA-L）は一体型⁽¹⁾・⁽²⁰⁾、2 MWクラス（LUBER）では3つのパッケージに分離している⁽²⁰⁾。原子炉容器は、原子炉からの放射線の影響を抑えるため月面土であるレゴリスの中に埋め込む方式を採用している。SPECTRA-Lの設置の状況を図6-1に示す。本節ではPSPECTRA-Lを対象に、原子炉周辺の線量当量率の評価結果について述べる。

1) 炉心の線量当量率

運転中の原子炉から放出される放射線は中性子と γ 線であり、中性子は構造材等との相互作用で2次 γ 線を放出し、原子炉構造材で幾らか減衰し原子炉外へ漏洩する。炉心周辺の遮蔽解析では中性子が主な線種であり、この中性子のスペクトルは、物質の配置及び線源の分布などが直接影響する。そこで炉心構造を詳細に分割し計算することができる前報⁽¹⁾4章で用いた3次元モンテカルロ輸送計算コードであるMCNPコードを利用して、SPECTRA-Lにおける中性子及び γ 線の線量当量率の軸方向分布を評価した。ここで図6-2に軸方向における中性子及び γ 線分布を示す。また、炉心における各々の線量当量率を表6-1に示す。

表6-1 炉心における中性子及び γ 線の線量当量率

単位：Sv/h

線種	中性子	1次 γ 線	2次 γ 線
線量当量率	1.0×10^8	2.0×10^5	8.0×10^4

この結果から、原子炉から放出される放射線の影響は中性子が大きく、 γ 線はその1/1000に過ぎないことがわかる。従って、原子炉から放出される放射線の遮蔽は、中性子について考えればよい。

2) レゴリスによる遮蔽効果

原子炉容器は、レゴリス内に埋め込まれることは既に述べたが、ここでは、レゴリスによる中性子及び γ 線に対する遮蔽効果を一次元解析で概算した。

使用した計算コードはXSDRNP/Sで、線源に隣接した遮蔽材を1次元無限平板体系

で解析するものである。使用した断面積ライブラリ及び放射線スペクトルは、中性子に対してはSCALE-27群で核分裂中性子のものを、 γ 線に対してはSCALE-18群でCo-60のものをを用いた。レゴリスの成分は、表6-2に示すアポロ計画で採取した土の中から月面基地の設置が最も考えられやすい“海”と呼ばれる区域のもの (mare soil) を用いた。

表6-2 アポロ計画で採取した月面土サンプルの成分 (重量比) ⁽²¹⁾

Element	Major Elements wt%				
	Mare Soil (10002)	Highland Soil (67700)	Basalt Rock (60335)	Anothosite Rock (60015)	Glass (60095)
SiO ₂	42.16	44.77	46.00	44.00	44.87
Al ₂ O ₃	13.60	28.48	24.90	36.00	25.48
CaO	11.94	16.87	14.30	19.00	14.52
FeO	15.34	4.17	4.70	0.35	5.75
MgO	7.76	4.92	8.10	0.30	8.11
TiO ₂	7.75	0.44	0.61	0.02	0.51
Cr ₂ O ₃	0.30	0.00	0.13	0.01	0.14
MnO	0.20	0.06	0.07	0.01	0.07
Na ₂ O	0.47	0.52	0.57	0.04	0.28

レゴリスは熱伝導率が小さく、密度が表層で1.4~1.9gf/cm³、地下数百mで1.74~1.94gf/cm³である⁽²²⁾。遮蔽計算においては遮蔽材単位体積当たりの各成分元素の原子数を与えなければならない。上記のようにレゴリスの密度の平均は1.7gf/cm³であるが、原子炉は図6-3に示すように表面直径11m、深さ3.5mの円錐状に一旦穴を掘り、原子炉を設置した後に埋め戻す⁽²⁰⁾。この埋め戻しの土壌は“乱した状態”となるため密度は1.15gf/cm³程度と推定される。この場合のレゴリス1cc当たりの原子密度は通常密度の時の個数に1.15/1.7を乗じることによって求められる。ここで、表6-3に通常時と乱した状態の時の1cc当たりの原子密度を示す。

表 6-3 通常時と乱した状態の時のmare soil 1cc当たりの原子個数

原子名	通常時 (密度: 1.7gf/cm ³)	乱した状態 (密度: 1.15gf/cm ³)
Si	7.28×10^{21}	4.92×10^{21}
Al	2.65×10^{21}	1.79×10^{21}
Ca	2.11×10^{21}	1.43×10^{21}
Fe	2.41×10^{21}	1.63×10^{21}
Mg	2.77×10^{21}	1.87×10^{21}
Ti	1.38×10^{21}	9.34×10^{20}
O	2.65×10^{22}	1.79×10^{22}

この2種類の密度に対し、線量当量率を1桁下げるために必要なレゴリスの厚さ、及び厚さ1m当たり下がる線量当量率の桁数を表6-4に示す。また、比較のために、中性子については水素化リチウムを用いた時の値、 γ 線についてはタングステンを用いた時の値を併記した。

表 6-4 1次元解析によるレゴリスの遮蔽効果

レゴリスの密度	遮 蔽 効 果			
	中 性 子		γ 線	
	order/m	cm/order	order/m	cm/order
1.7 gf/cm ³	1.80	55	4.20	24
1.15gf/cm ³	1.21	83	2.76	6.3
Tungsten	—	—	21.4	4.67
LiH	64.8	1.54	—	—

3) 原子炉運転中周囲 (径方向) の線量当量率の評価

SPECTRAL: 2 MWt定格運転中の原子炉周囲 (径方向) の線量当量率を示したものを図6-4に、レゴリスを通過して月面に到達する放射線を、原子炉中心からの水平距離の関係で示したものを図6-5に示す。原子炉の周囲には、原子炉中心から2.25mまでの位置に放熱板があり、約15mまでの月面には熱の反射を抑えるため

のサーマルエプロン（アルミニウムの箔）が設置されている。

図6-5から、原子炉中心から約10mで宇宙線によるバックグラウンドレベルと等しくなり、約11.5mで地球上の自然放射線によるバックグラウンドレベルと等しくなることがわかる。ここでは、中性子のみの評価を行っているが、 γ 線の影響は1)で述べたように中性子に比べて低く、2)で述べたようにレゴリスによる遮蔽効果も中性子に比べて高いことから今回の原子炉からの放射線の影響評価は妥当であるといえる。こうして、サーマルエプロンの外側では、原子炉から放出される放射線の影響は、無視することが可能である。ただし本解析では月面上のプラント構成物による散乱中性子や、そこで発生した2次 γ 線、さらに原子炉に近い地表から漏洩した中性子については考慮していないので今後このような放射線も評価できる2次元解析を実施する必要がある。

4) 原子炉運転中周囲（軸方向）の線量当量率の評価

原子炉運転中周囲（軸方向）の線量当量率は、炉容器の上部に2m厚さのレゴリスと熱交換器や電磁ポンプ、ジェネレータといったプラントの設備がある以外に遮蔽物は存在しない。原子炉直上のレゴリス表面では、図6-3に示した炉上部の線量当量率である $3.93 \times 10^9 \text{ mSv/h}$ より下がっても 10^7 mSv/h にとどまる。その後はプラント設備による減衰を受け、その外側では距離の二乗に反比例して減衰していく。原子炉運転中施設上部は立入禁止もしくは制限区域として指定するか、あるいは、原子炉上部の遮蔽を強化する必要がある。

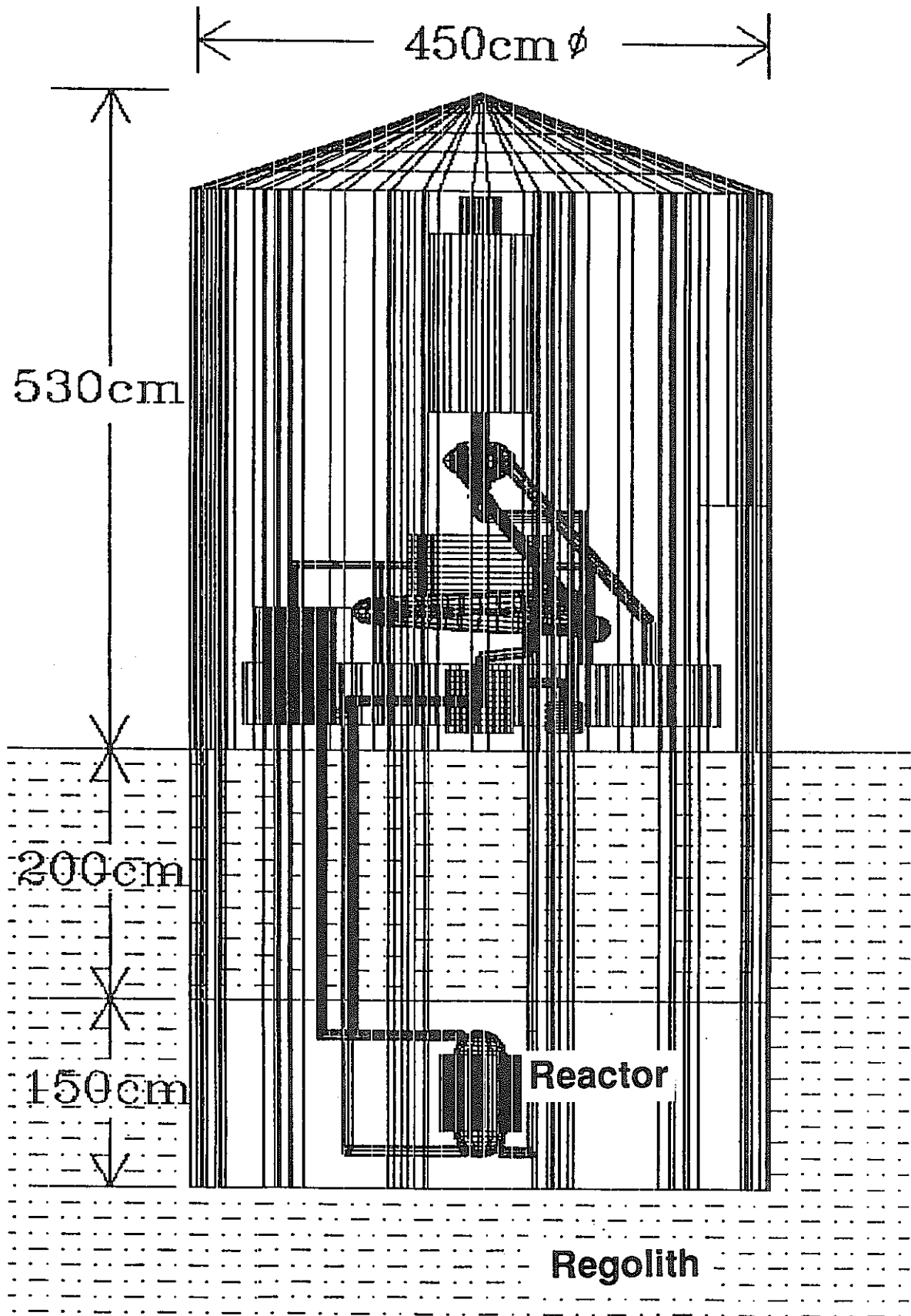


図6-1 月面におけるSPECTRA-L設置図

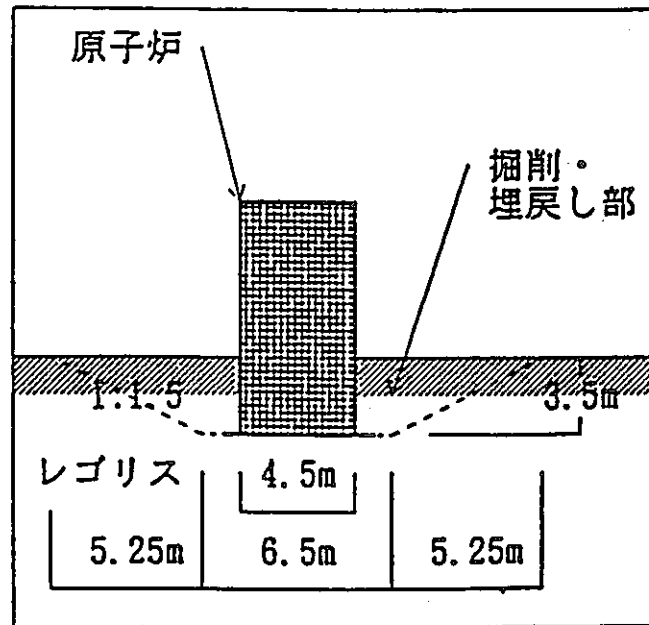


図6-3 SPECTRA-L設置のための掘削範囲

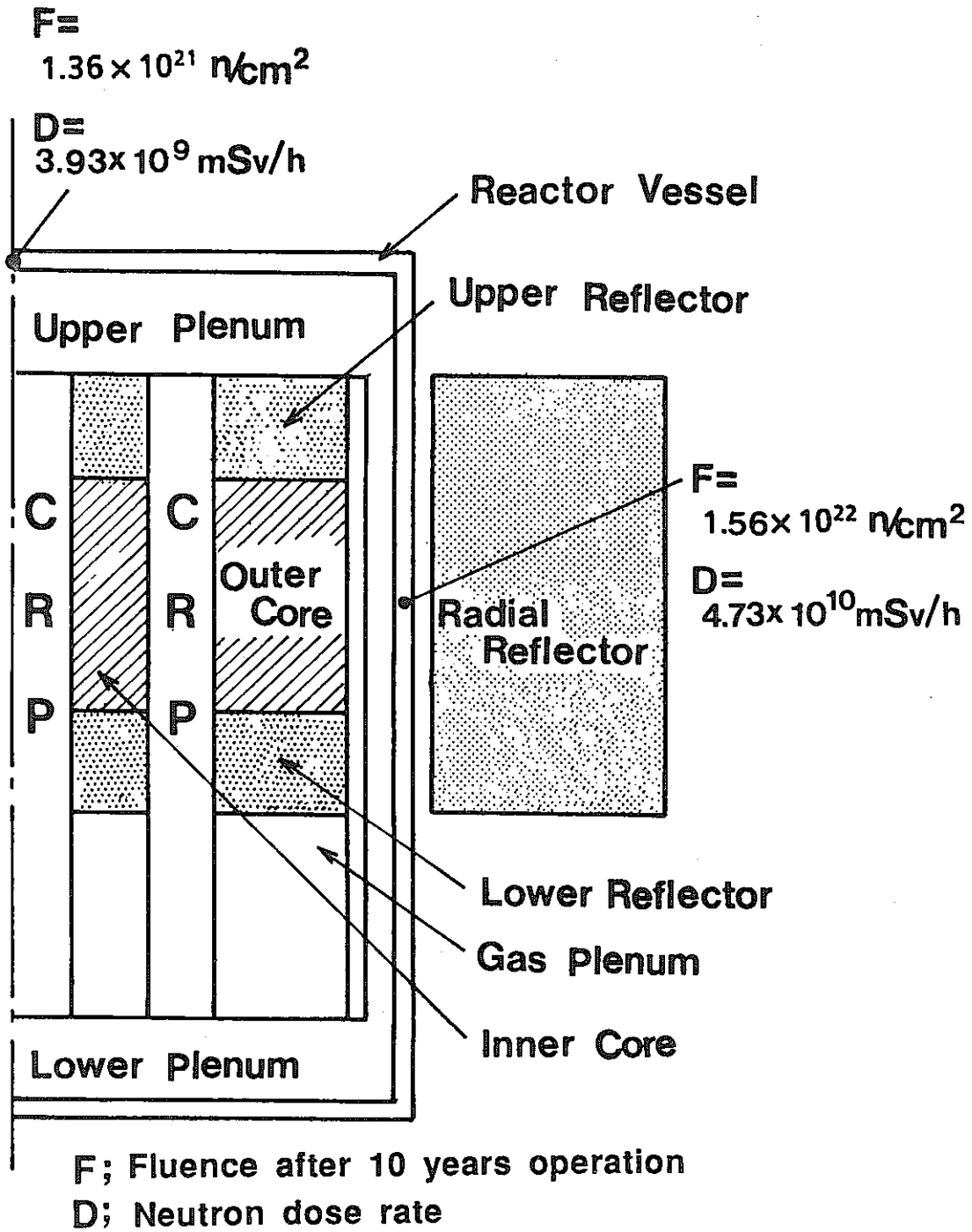


図 6 - 4 2 MW定格運転時の原子炉周囲（径方向）の線量当量率

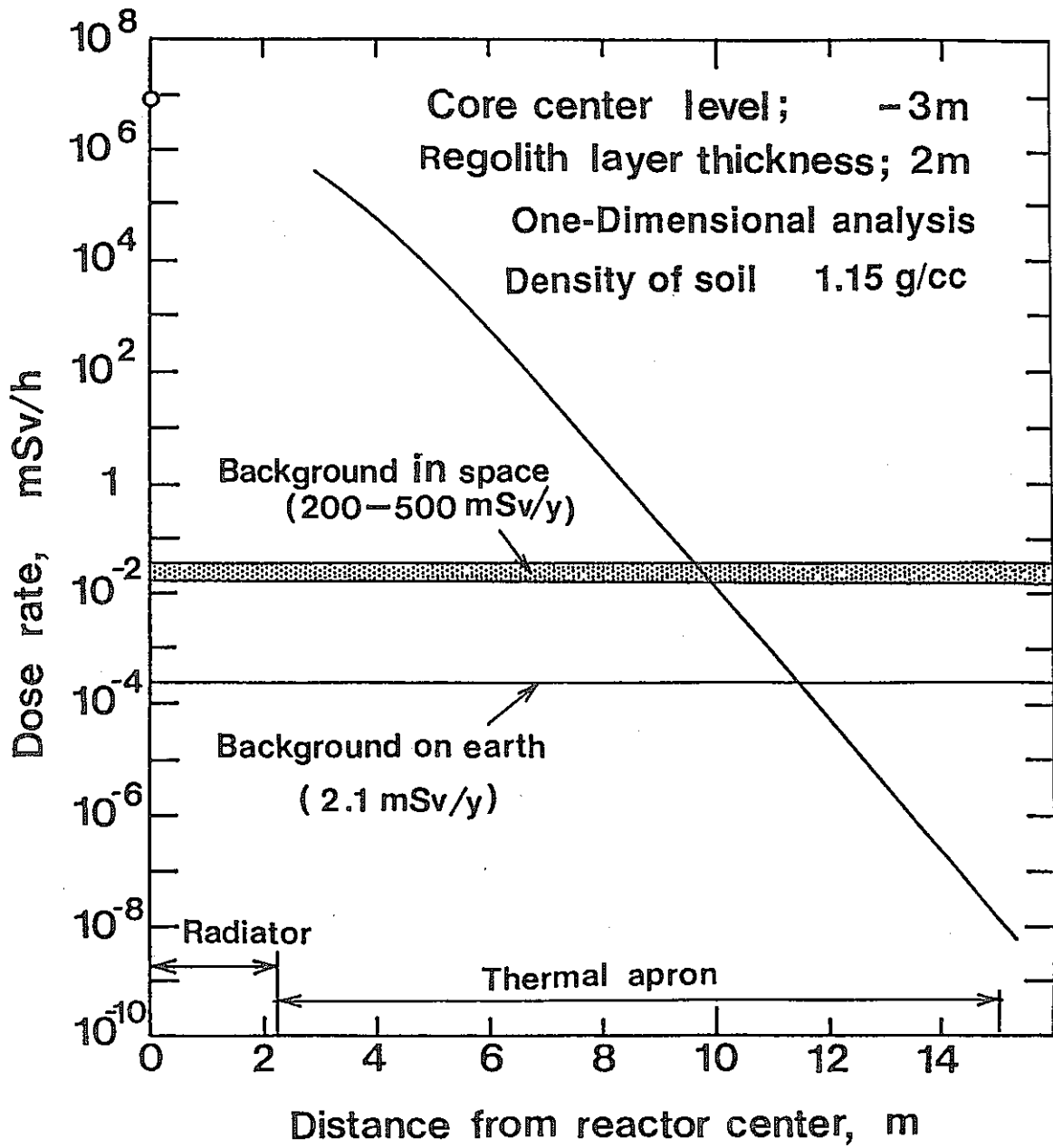


図6-5 SPECTRA-L運転中における地表面の中性子軸方向減衰曲線

第7章 お わ り に

月面上に代表される宇宙環境の開発は、今後飛躍的に進められ、将来一般人が長期間宇宙で居住する時代も来ると予測されるが、地上に比べ格段に厳しい放射線環境に対処しなければならない。一方、安定した大容量エネルギーを供給する原子力エネルギーの設置を検討する上でも放射線に対する何らかの線量当量限度の設定が必要である。しかしながら、宇宙における線量限度について国際的に定められたものはないため、本書ではその素案を提案した。また、それに基づき別途検討を進めている月面可搬型炉の遮蔽構造の1次元解析を実施・評価し、それが妥当なものであると判断した。ここで、表7-1にこれまで述べてきた各種線量当量限度の一覧表を示す。

表7-1 線量当量限度一覧表

			線 量 当 量 (mSv)						
			1週間	1か月	3か月	6か月	1年	生涯	
自然放射線*	地 上		-	-	-	-	2.1	-	
	Back Ground 宇 宙		10 ⁴ **	-	-	-	200~500	-	
線 量 当 量 限 度	地	ICRP	従 事 者	-	-	-	-	20	-
			一 般 公 衆	-	-	-	-	1	-
	上	国内	従 事 者	-	-	-	-	50	-
			一 般 公 衆	-	-	-	-	1	-
月 面 上	ソ 連		-	500	800	1100	1500	-	
	米 国		-	250	-	-	500	~4000	
	検 討 案	自然放射線に対し	-	40	-	-	400	~2000	
		原子炉に対し	-	-	-	-	40	-	

* : 自然放射線から受ける線量当量

** : 太陽フレアによる影響 (過去の測定)

なお、宇宙放射線から守るため居住区域は地下立地（ジオフロント）を採用し、他施設付近で作業する場合も月面上に出ることを極力避け、地下道を利用して目的の地点へ向かう設計が良い。一方、居住区周辺は磁気を利用した放射線シールドを検討・製作し、これを用いて宇宙線の大半である荷電粒子を防御することで被ばくを最小限に食い止めることが可能と考えられる。また、このシールドの可搬型モデルを製作することによって、月面上で様々な作業を行う時の区域や機器の防御として用いることが可能となろう。さらに小型化を図り個々の作業者が装着することにより被ばく防止を行うことができる。これと共に、被ばく防止効果を持ち作業性の良い防護服の素材開発が望まれる。

謝 辞

本検討においてレゴリスによる遮蔽計算では、臨界工学実験室大谷暢夫室長の協力を得た。また、原子炉における線量当量率の計算では三菱総合研究所の角田和弘氏の協力を得た。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 野村紀男、羽賀一男、大坪 章、“月面動力プラント S P E C T R A - L の概念検討 (I) - 打ち上げ失敗時の安全評価、” PNC ZN9410 91-100、1991年3月。
- (2) Lucky. T.D.、松平寛通訳、“放射線ホルミシス、” p.11~p.29、1989。
- (3) 日本保健物理学会企画委員会、法令改正に伴う Q & A、p.29、1989。
- (4) Hall, E.J., “Radiation and Life,” Pergamon Press, Elmsford, N.Y., 1976。
- (5) Mason, G.M., “Cosmic Ray Life Span is 17 Million Years,” Chem. Eng. News, 55F, p.5, 1977。
- (6) “Guidance on Radiation Received in Space Activite,” NCRP REPORT No.98, 3. Radiation Environment in Space, p.15~p.26, 1989。
- (7) Lewin, W.H.G., “X-ray Outbursts in Our Galaxy,” Am. Sci., 5, p.605, 1977。
- (8) Stecker, P.W., “Gamma Ray Astronomy and the Origin of Cosmic Rays,” Am. Sci., 6, p.570, 1978。
- (9) 斎藤利生、“宇宙工学概論、” 10.3.1、p.229、1969。
- (10) Lyon. W.S., “Trace Element Measurement at the Coal-Fired Stream Plant,” CR Press, Cleveland, 1977。
- (11) Pfister, H., Phillip, G. and Pauly, H., “Popuration Dose from National Radionuclides in Phosphate Fertilizers,” Radiat. Environ. Biophys, 13, p.247, 1976。
- (12) 下平勝行、“宇宙半導体とその放射性対策、” Radioisotope, Vol.36, No.2, p.35~p.44, 1987。
- (13) Silberg, R., Tsao, C., et al., “Radiation Hazards in Space,” Aerospace America, p.38~p.41, October, 1987。
- (14) I C R P 専門委員会 / I C R P 勧告翻訳検討委員会訳、“ICRP Publication 42 : I C R P が使用しているおもな概念と量の用語解説、” (42) p.18、1985。
- (15) ICRP, “Recommendation of the Commition-1990 (Publication 60),” 9-3, 1990。

- (16) 加藤和明、 “宇宙航空士の放射線被ばく管理基準 新種の職業人放射線被ばく、”
日本原子力学会誌、 Vol. 31、 No. 4、 p. 422～p. 427、 1989.
- (17) Vorob'ev, E. I. et al., “Radiation Safety Standards for Space Flights,”
Soviet At. Energy, Vol. 50, No. 5, p. 301～p. 303, 1981.
- (18) Roth, B. M. et al., 山根登訳、 “人間環境系, 上巻、” 人間機能データブック、
Ⅱ. 電離放射線、” 人間と技術社、 1972.
- (19) Angelo, Jr. et al., “Radiation Protection Issues and Techniques Concerning
Extended Manned Space Mission,” IAEA-CN-51/56, 1988.
- (20) 羽賀一男、野村紀男、片岡 一、清野 裕、引地拓男、大坪 章、 “月面動力プラ
ントの概念検討、” 1991.
- (21) T. D. Lin, “Concrete for Lunar Bases Construction,” Symposium of Lunar Bases
and Space Activities of the 21st Century, Washington D. C., October, 1984.
- (22) 小畑益彦 他、 “極限環境における可搬型炉設計条件の検討、” PNC SJ 9060
90-001、 p. 8～p. 9、 1991.