宇宙用原子力動力源の安全技術*

(ソ連原子力衛星の落下に関する国連討議資料より)

山 中 龍 夫**

1. ま え が き

1978年1月24日にカナダ北東部に墜落したコスモス954は原子炉が搭載されていたゆえに世界に衝撃を与えた。コスモス954はミッション終了後高高度の軌道に軌道変換される予定であったが、軌道制御系の故障のために軌道上昇が不能の状態に陥り大気層の抵抗によって人工衛星としての飛行エネルギーを失いながら自然落下したものである。この事件は宇宙開発の国際的安全問題として世界の関心を集め、国連の宇宙空間平和利用委員会において宇宙用原子力動力源の安全性に関する討議を呼び起こすこととなった。1978年11月10日、第33回国連総会において“宇宙における原子力動力源の利用に関する特別作業部会”の設定が決議された。1979年2月の第1回作業部会と1980年1月の第2回作業部会において討議された主要な技術的諸問題と、これらの作業部会に提出された米国およびソ連の資料を中心とする宇宙用原子力動力源利用に関する安全技術について述べる。

2. 米国およびソ連の原子力動力源を利用する人工衛星と第1回国連作業部会の討議内容

1957年に人類最初の人工衛星が打ち上げられてから現在までに約2,000以上の人工衛星が宇宙空間に打ち上げられており、その過半数はすでに地球大気圏に再突入している。これらの人工衛星のなかで米国は20以上およびソ連は20弱の原子力動力源を搭載する人工衛星を打ち上げており、米国およびソ連以外の国は原子力動力源を宇宙においては利用していないといっている。したがって、まず米国およびソ連の利用状況を概括する。また、原子力動力源の宇宙利用に関する国連における原則的な合意点と安全技術上の諸問題は第1回作業部会の討議報告に集約されているのでこれらを概括する。

2.1 米国の宇宙用原子力動力源 米国が宇宙空間に打ち上げた原子力動力源を搭載する人工衛星について1977年までのものを第1表に示す¹⁾。これらのなかで事故により地上に墜落したものはプルトニウム238ラジオアイソトープを利用するものが3個と濃縮ウランウム235を利用する原子炉を搭載したものが1個である。

1964年4月に米国の国防省が打ち上げたTRANSIT-5 BN-3はラジオアイソトープ電池SNAP 9Aを搭載して実用航行衛星を目的としていたが、軌道投入に失敗して、マダガスカル北方の西インド洋上空で大気圏に再突入後、燃え尽きたと報告されている。なお、SNAP 9Aの燃料容器は大気圏再突入の際に燃え尽きるように設計されていたが、この事故以後に設計されたすべての米国のラジオアイソトープ・システムは空力加熱と地球表面への落下の際の衝突に耐える機能をもつカプセルに封入する設計となっている。

1968年5月にNASAが打ち上げたNIMBUS-B-1はラジオアイソトープ電池SNAP 19を搭載して気象衛星を目的としていたが、打上げ時の誘導の失敗のため飛行安全命令によりロケットとともに爆破されたが、ラジオアイソトープ・カプセルはカルフォルニア沖サンタバーバラ海峡から回収された。

1970年11月に有人月面探査アポロ13号はサービスマジュールの燃料系故障のために月面着陸を中止して地球に帰還したが、この際、電源利用のために月着陸船とともに帰還軌道をともにして地球再突入前に月着陸船を分離した。この分離した月着陸船にはラジオアイソトープ電池SNAP 27が月面での観測ミッション用に積み込まれていた。したがって、SNAP 27は月着陸船とともに地球大気圏に再突入し、南太平洋フイジー諸島の南方トンガ近くの高深さ6~9kmの海面下に沈み回収不能の状態にある。落下軌道周囲の大気サンプリングや落下点海域での海水サンプリングではSNAP 27からの放射性物質の洩れは測定されていないとされている。

米国が打ち上げた唯一の原子炉は、1965年4月に打ち上げたエネルギー省とNASAとの共同計画による

* 昭和55年6月6日原稿受理 Technical Aspects and Safety Measures of Nuclear Power Sources in Outer Space

** 航空宇宙技術研究所 Tatsuo YAMANAKA

第1表 米国の衛星に搭載された原子力システム (1961~1977)

種 別	衛 星 名	衛星の種類	打上げ日	原 子 力 シ ス テ ム	プルトニウム 238 燃 料	総 量 (キュリー)	状 況
平和目的 (ラジオ アイソ トープ)	ニンバス-B *	気 象 衛 星	1968. 5. 18	SNAP 19	Microspheres	34,400	打上げ失敗, 海中より回収
	ニンバス-3	"	1969. 4. 14	"	"	37,600	軌道寿命約 3,000 年の軌道上
	アポロ 12号	月 探 査 機	1969.11.14	SNAP 27	Microspheres	44,500	月 面 上
	アポロ 13号	"	1970. 4. 11	"	"	"	南太平洋深海中
	アポロ 14号	"	1971. 1. 31	"	"	"	月 面 上
	アポロ 15号	"	1971. 7. 26	"	"	"	"
	アポロ 16号	"	1972. 4. 16	"	"	"	"
	アポロ 17号	"	1972.12. 7	"	"	"	"
	パイオニア 10号	木星探査機	1972. 3. 3	SNAP 19 (改良型)	Cermet	80,000	木星／深宇宙
	パイオニア 11号	"	1973. 4. 6	SNAP 19 (改良型)	"	"	"
	バイキング 1号	火星探査機	1975. 8. 20	"	Cermet	42,000	火星表面上
	バイキング 2号	"	1975. 9. 9	"	"	"	"
軍事目的 (ラジオ アイソ トープ)	ボイジャー 1号	木 星／ 土星探査機	1977. 9. 25	—	Oxide Spheres	210,000	木星／土星へ
	ボイジャー 2号	"	1977. 8. 20	—	"	"	"
	トランシット 4 A	航 行 衛 星	1961. 6. 29	SNAP 3	Metal	1,800	軌道寿命 500 年以上の軌道上
	トランシット 4 B	"	1961.11.15	"	"	1,800	軌道寿命 1,000 年以上の軌道上
	トランシット 4-BN-1	"	1963. 9. 28	SNAP 9A	"	17,000	" "
	トランシット 5-BN-2	"	1963.12. 5	"	"	17,000	" "
	トランシット 5-BN-3*	"	1964. 4. 21	"	"	17,000	打上げ失敗, 再突入時に燃え尽きた
	トランシット	"	1972. 9. 2	RTG	Cermet	24,000	軌道寿命 1,000 年以上の軌道上
	LES 8	通 信 衛 星	1976. 3. 15	—	Oxide Spheres	280,000	軌道寿命 4,000 年以上の軌道上
	LES 9	"	1976. 3. 15	—	"	"	" "
	実験目的 (原子炉)	スナップショット	原子炉搭載 実験衛星	1965. 4. 3	SNAP 10A	燃料: 濃縮ウラ ン 235=4.5 kg	

技術開発衛星 SNAPSHOT 1号に搭載された濃縮ウラン 235 を用いた原子炉電源 SNAP 10A である。高度約 1,300 km の円軌道に打ち上げられてから原子炉は始動され 48 日間軌道上での運転実験が行なわれたが、誤電気信号によって原子炉は運転を停止した。再始動不能の状態のままで現在も地球軌道上にある。文献 1)によると、運転停止時の核分裂物質の原子炉内蓄積量は約 2×10^5 キュリーであるが、15 年

経た 1980 年では約 100 キュリーに減衰しており、100 年後の 2065 年には 10^{-1} キュリーになるものと予想している。なお、軌道高度約 1,300 km の SNAPSHOT 1号が地球に落下するまでには 4,000 年は経過するものとも予想されている。

第2表 宇宙で用いられた核物質のゆくえ (米国関係)

◎ 打上げ回数 (ラジオアイソトープ)……21回 (1961.6~)
プルトニウム 238 の量 (キュリー)

総 量	1,361,600
深 宇 宙	580,000 (43%)
軌 道 上	379,200 (28%)
月 面	222,500 (17%)
火星表面	84,000 (6%)
太 平 洋	44,500 (3%)
回収したもの	34,400 (2%)
大 気 中	17,000 (1%)

◎ 打上げ回数 (原子炉)……1回 (1965.4.3)
ウラン 235 の量 (軌道上)

第1図 宇宙用原子力電源の進歩 (A/AC. 105/L. 102)

第3表 ソ連の海洋監視レーダー衛星の打上げ一覧

衛星名	打上年月日	軌 道			周 期	搭載原子炉の高軌道への切り離し	ミッション期間
		近地点	遠地点	傾斜角			
コスモス 198	1967. 12. 27	265 km	282 km	65.1°	89.8分	?	?
209	1968. 3. 22	249	282	65.1	89.6	1986. 3. 28	3日
367	1970. 10. 3	932	1030	65.3	104.5	?	?
402	1971. 4. 1	261	279	65.0	89.7	?	?
469	1971. 12. 25	259	276	65.0	89.7	1972. 1. 4	11日
516	1972. 8. 21	256	277	65.0	89.6	1972. 9. 21	1ヵ月
626	1973. 12. 27	257	280	65.0	89.7	1974. 2. 11	47日
651	1974. 5. 15	256	276	65.0	89.6	1974. 7. 25	2ヵ月10日
654	1974. 5. 17	261	277	65.0	89.7	1974. 7. 29	2ヵ月12日
723	1975. 4. 2	256	277	65.0	89.6	—	約2ヵ月
724	1975. 4. 7	258	276	65.0	89.7	—	約2ヵ月
785	1975. 12. 12	259	278	65.0	89.7	1975. 12. 15	3日 (失敗)
860	1976. 10. 17	260	278	65.0	89.6	1976. 11. 10	24日
861	1976. 10. 21	256	280	65.0	89.6	1976. 12. 20	2ヵ月
952	1977. 9. 16	258	278	65.0	89.7	1977. 10. 18	1ヵ月2日
954	1977. 9. 18	259	277	65.0	89.6	1978. 1. 24 落下 (失敗)	

米国が1961年から1977年までの16年間に宇宙空間へ打ち上げたラジオアイソトープの総量の各軌道への配分は第2表に示す。また、米国での宇宙における原子力電源の出力増加の予想を第1図に示す。人工衛星搭載原子力電源の出力レベルの増加と打上げ回数増加は将来の宇宙における放射性物質の安全性をいっそう重要なものにする。

2.2 ソ連の宇宙用原子力動力源 ソ連の宇宙用原子力動力源の打上げ記録は公表されていない。文献2)によると、ソ連は1967年12月に打ち上げたコスモス198以後、カナダ北東部に1978年1月に墜落したコスモス954までに、少なくとも、16個の原子力電源を搭載した人工衛星を地球周回軌道に打ち上げているとされている。これらは第3表に示されるように海洋監視レーダー衛星と考えられている。この衛星は、海面下を潜航する原子力潜水艦の航跡に生ずる海表面のプランクトンの生態パターンの変化を感知して原潜の動きを追跡することを目的としていると考えられている。これらのレーダー衛星に搭載されている原子炉はロマーシュカとよばれ、熱電対で原子炉の熱エネルギーを直接電気に変換するシステムである。コスモス954にはロマーシュカが搭載されていたものと考えられている。

第2図と第3図はロマーシュカの炉体を熱電気変換部を示す。燃料としては濃縮ウラン235を49kg搭載し、熱電対はシリコン/ゲルマニウムを使用しており、発生電力として500~800Wを得ている。この炉は宇宙用としてクルチャフ研究所が1970年に開発したものである。

ソ連の原子炉を搭載するコスモス衛星は低軌道での

第2図 ソ連原子炉ロマーシュカ本体

第3図 ロマーシュカの熱電気変換部

ミッションが終了すると、原子炉部分は切り離されてから高度1,000km程度の円軌道へ遷移されることになっており、軌道上昇した原子炉が地上に落下するまでには約600年は経過するものと考えられている。コスモス954はこの軌道変換システムが故障のため作動しなくなったのである。

2.3 第1回宇宙空間における原子力動力源使用に関する作業部会報告の結論と勧告 第1回の作業部会は1979年2月にニューヨークにおいて1週間にわたって開催された。作業部会の報告書³⁾は38項目の討議要約と6項目の結論および勧告から成り立っており、1979年6月の国連宇宙空間平和利用委員会第22会期において採択されている。この報告書の結論は国連における宇宙用原子力動力源使用に関する合意であるという意味において重要であり、また、勧告は今後の関心の方向を示す意味において重要であるから、ここに要約を述べる。

第1回作業部会の結論 宇宙用原子力動力源にはラジオアイソトープ動力源と原子炉動力源の二種類が使用されている。この両動力源の安全性に関しては、i) 設計上の問題、ii) 通常の運用上の問題、iii) 異常な状態における問題、と技術的に区分して検討されねばならない。

原子力動力源を搭載する人工衛星の軌道ミッションのあらゆる段階(打上げ、軌道上の運用、再突入)において放射線保護の基準としては、基本的に、現在国際的に取り入れられている放射線保護に関する国際委員会* (ICRP: International Commission on Radiological Protection) によって勧告されている基準(とくにICRP文書No. 26)⁴⁾によるべきである。

ラジオアイソトープ動力源の安全性は、あらゆる正常および異常状態に対しても、ラジオアイソトープを封じ込める設計によって確保されるべきである。設計としては、放射性物質が最小漏れであることを保証し、打上げ時の事故、大気圏への再突入、地上への衝突または水中に長期間浸される場合のあらゆる環境に対してICRPの勧告限度を越えてはならない。

原子炉動力源の安全性は、ミッション終了後も放射性物質が崩壊して安全レベルに達するまで十分高い軌道に保持されるならば、さしたる問題はない。原子炉が低高度で運用を開始される場合には、人工衛星の寿命に比較して放射性物質が崩壊する時間のほうがはるかに長いから、運用終了後高高度軌道へ原子炉システムを軌道上昇することで安全性は確保できる。高高度軌道への軌道上昇に失敗した場合には、あらゆる環境に対しても放射性物質を大気中に拡散させなくてはならない。この場合に、地上に到達する放射性物質の濃

度はICRP勧告に適合していなければならない。

以上に示す安全性の配慮が十分満たされるならば、宇宙における原子力動力源は安全に使用しうる。ミッション要求を満足する一方で安全上の要求が満足できるならば、原子力動力源の使用は技術的考察に基づいて決定すべきである。

第1回作業部会の勧告 将来の作業部会の討論を進めるために、各国は次の4項目の課題について調査を行なうよう勧告している。

- (i) 宇宙用原子力動力源使用に関する安全問題のリストの作成
- (ii) ICRP勧告の適用上の問題点
- (iii) 再突入軌道予測改善に関する既存手段の評価
- (iv) 各国への通報フォーマット

3. 宇宙用原子力動力源の米国およびソ連の安全技術

第1回および第2回原子力動力源の宇宙利用作業部会に提出された米国およびソ連からの報告書^{1), 5), 6)}をもとにして、宇宙用原子力動力源の安全技術について述べる。米国はその活動が主としてラジオアイソトープ電池の利用に偏っているがゆえに、ラジオアイソトープ電池の安全問題を中心とした報告書を提出している^{1), 5)}。これに対して、ソ連は原子炉の宇宙利用を推進してきたがゆえに、原子炉電源の安全問題を中心とした報告書を提出している。

3.1 ラジオアイソトープ電池の安全技術 米国においては1971年以降、地球環境に影響を与えるおそれのある活動に関しては環境に対するインパクト報告、EIS (Environmental Impact Statements) を提出することになっている。人工衛星に放射性物質を搭載する場合には、INSRP (特別省間原子力安全審査パネル) がこれを審査する。パネルの構成は国防省、エネルギー省、NASA、環境保護庁および原子力規制委員会から成っている。このパネルは実施責任の外にあるメンバから構成されて、ハードウェアの設計、大気放出時の環境、正常運用時の環境および何らかの潜在的事故の可能性が審査される。米国はこのような背景から、第2回作業部会において次にその概要を述べるようなラジオアイソトープ動力源に関する設計のガイドラインが国際的に準備できるのではないかと提案をした⁵⁾。しかし、各種の討議が行なわれたうえで国際的なこの種のガイドラインを作成する方向まではまだ進まず、第2回作業部会の報告書では打ち上げ国自身のガイドラインが米国およびソ連から提出されたことを確認するのに留まった⁷⁾。

* 国際放射線防護委員会 (ICRP) は1928年に第2回国際放射線医学会議によって創立された。委員会の方針は、適切な放射線防護方策の基礎となる基本原則を考えることであるとしている。ICRP文書No. 26は1977年に採択されている。内容は、放射線防護の目標、放射線防護の基本的な概念、放射線生物学上の考察、線量制限の体系、放射線防護実施の一般原則、異なる種類の被曝への適用、その他付録から成っている。

3.1.1 米国の提案した安全に関するガイドライン

このガイドラインはプルトニウム 238 を使用する宇宙用動力源の安全設計のためのものである。その目的は宇宙で使用する放射性物質が人間や地球の環境に対する影響を制限することにある。正常時には封じ込めて放射線を外部へ洩らさないことが絶対的条件である。事故が発生しても可能な限り放射線の洩れを低く抑えて、その安全性の基準は確率論に基づいて行なわれる。

安全報告書の提出 安全報告書はシステム開発の 3 段階で提出する。それらは、基本設計安全解析報告書 (Preliminary Safety Analysis Report)、詳細設計安全解析報告書 (Updated Safety Analysis Report) および最終安全解析報告書 (Final Safety Analysis Report) である。

基本設計安全解析報告書は基本設計終了後 120 日以内に提出する。報告書の内容には、設計に関する説明、故障モード解析、放射線安全解析が記載されねばならない。解析に用いるデータは動力源の開発研究段階で得られた安全に関するものが使用されねばならない。

詳細設計安全解析報告書はシステムの詳細設計終了後 90 日以内に提出する。報告書の内容は基本設計安全解析報告書と同一であるが、次の項目が追加される。1) ミッションに関する説明、2) 特定ミッションの環境と本ガイドラインが示す環境条件との差、および 3) 詳細設計終了に至る開発段階で得られた最新の故障モード解析を報告する。

最終安全解析報告書は打上げ予定日の 1 年前に提出する。内容は最終システムと最終ミッションの説明、および各種認定および受入れ試験段階で得られた結果に基づく安全評価報告書を記載する。

放射線量制限 原子力動力源の設計は第 4 表に示す放射線量制限に適合させねばならない。被曝線量とは、ICRP 文書 No. 26⁴⁾では線量当量 H で規定されるもので、被曝組織の単位重量当たりの被曝エネルギーで表わされる。すなわち、 $H=DQN$ で表わされ、 D は吸収線量、 Q は線質係数とよばれており放射線の種類によって 1~20 が割り当てられている。線質係数は水中の衝突阻止能力の関数分布で与えられるが、放射線の水中衝突阻止能力の分布がわからない場合には、種々の種類の一次放射線に関係づけられている $\bar{Q}$ の近似値を使用することが許されており、 X 線、 γ 線、電子に対しては $\bar{Q}=1$ 、エネルギー不明の中性子、陽子、静止質量が 1 原子質量単位より大きい電荷 1 の粒子に対しては $\bar{Q}=10$ 、エネルギー不明の α 粒子と多重電荷の粒子に対しては $\bar{Q}=20$ を使用することを

第 4 表 宇宙用原子力動力源の被曝線量制限

管理区域内での個人に関する被曝線量制限		
被曝のタイプ	条 件	被曝線量制限 (レム)
全身、頭部と胴体、造血組織、生殖腺、または水晶体	蓄積被曝線量	$5(N-18)^*$
	3 カ月間	3
皮膚、甲状腺、および骨	年 間	30
	3 カ月間	10
手、前腕、足および足首	年 間	75
	3 カ月間	25
その他の組織	年 間	15
	3 カ月間	5

* N : 次の誕生日における年齢

非管理区域での個人に関する被曝線量制限		
被 曝 の タイ プ	被曝の可能性のある地点での最も危険な個人に対する年間被曝線量制限 (レム)	被曝した地区住民の個人に対する年間平均被曝線量制限 (レム)
全身、生殖腺または骨髄	0.5	0.17
その他の組織	1.5	0.5

ICRP は勧告している。 N は ICRP が規定したその他すべての修正係数の積であり、現在のところ ICRP は $N=1$ としている。被曝線量の国際単位はシーベルト (Sv) が使用されるが、第 4 表に示される単位レムとの関係は 1 シーベルト = 100 レム = 1 ジュール/kg である。

管理区域内での被曝線量制限は被曝時間を制限する。非管理区域内ではコンテナのような遮蔽装置によって適合させる。

事故発生時においては、燃料の中心部から 10m 離れた地点で一般市民が全身に受ける放射線は年間 5 レム (50 ミリ Sv) 以下になるような設計をする。肺、骨、肝臓等の一般市民の主要器官に対する線量は同上条件において年間 15 レム (150 ミリ Sv) を超えてはならない。ちなみに、人体の組織が自然界から受ける放射線による被曝線量当量は 0.1~20 レム/年以上とされており、これらの安全基準の値は事故発生時において自然放射線被曝当量の高い値の平均値にある。

燃料の封じ込め 燃料の封じ込めシステムの設計に際しては、事故が発生しても、地球圏内での洩れは搭載燃料の 1 キュリー当り 10^{-13} キュリー以下で、1 回の打上げ当りの洩れの放射性物質の総量は 10^{-8} キュリー以下としなければならない。事故のため水中または海中に落下した場合には、落下点から 10m 離れたところで 3 年間以上は 3×10^{-5} キュリー/ml 以上のプルトニウム 238 濃度が検出されない構造としなけれ

第5表 事故発生時の環境

ミッション フェーズ	項 目	ク ラ ス 1	ク ラ ス 2	ク ラ ス 3
1)輸送時	全 環 境	AECマニュアル 0529 付属書類 182	同 左	同 左
2)打上げ時	2.1)爆風圧	静圧増加, よどみ点圧力, 抗力圧力, 反射波静圧増加, 静インパルスについて 各クラス別に爆発点からの距離の関数として図で示す.		
	2.2)破片衝突	無 し	0.1 m ³ のタンク破片が 60 m/sec の速度で衝突する. 40 kg, 0.03 m ³ の物体が 10 m/sec の速度で衝突する.	0.1 m ³ のタンク破片が 150 m/sec の速度で衝突する. 40 kg, 0.03 m ³ の物体が 30 m/sec の速度で衝突する.
	2.3)衝 突	30 m/secでコンクリートへ	100 m/sec で地面へ	300 m/sec で地面へ
	2.4)液体燃料の火事	60分間残留燃料の火事	熱流束と温度を時間に対して図で示す.	
	2.5)固体燃料の火事	接近状態で2分間	接近状態で5分間	接近状態で10分間 接触状態で5分間
	2.6)同上組合せ	無 し	クラス1で2.3)項のみ除く	クラス2全部
3)再突入	3.1)空力加熱	自然落下	主トリム姿勢で急角度突入 $V < 10 \text{ km/sec}, r < 90^\circ$ および $V < 13 \text{ km/sec}, r < 15^\circ$	第2トリム姿勢で急角度突入 $V < 10 \text{ km/sec}, r < 90^\circ$ および $V < 13 \text{ km/sec}, r < 15^\circ$
4)着 地	4.1)着地衝突	110% 自由落下速度で地面 上へ	110% 自由落下速度でコンクリ ート上へ	110% 自由落下速度で工具鋼上 へ
5)着地後	5.1)陸 地	地表に6カ月 100% 埋没で6カ月	地表に2年間 100% 埋没で2年間	地表に50年間 100% 埋没で50年間

ばならない。

事故が発生した場合の環境に関する設計の基準として、第5表に示すような3段階のクラスに分ける。クラス1の発生確率は 10^{-2} 、クラス2は 10^{-3} 、クラス3は 10^{-4} と考えられている。最終安全解析においては実際のミッション環境に適合するクラスの事故に対する安全設計がなされているか否かの審査を行なう。これらの設計は各開発段階において試験を行なうことによって確認されねばならないが、ハードウェアの安全に関する認定に際しては、実際のプルトニウム238を装填して行なわねばならない。つまり、代燃料による試験は許されない。また、この試験では2個以上の連続する事故の相乗効果も十分に確かめなければならない。安全に関する基準は統計学的な確率論で計算されるが、そのデータはできうる限り試験によって準備すべきである。試験項目の選択、試験手順の設定には十分に納得できる計画を立て、すべての試験に対して、その目的、試験内容、試験費用、試験実施前の解析結果と試験実施結果を提出しなければならない。

設計目標としては、正常時における熱源のヘリウム逃気機能、材料の適合性、耐放射線性、耐宇宙塵性、耐荷重特性、打上げ環境に対する耐性を規定する。異常時に対しては、動力源を分離する際の熱的および構造荷重、温度条件、材料の適合性、再突入に際しては、動力源の分離機能、再突入時の安定トリム姿勢の確保、空力加熱による熱解析、熱防御部のアブレーション特性、電源内部の熱応答、熱防御部の熱応力解

析、地球表面衝突時の空力解析、落下点の分散、各種衝突条件（地表面における）に対する放射線の洩れを許容値以下に抑える設計条件を示す。

3.2 宇宙用原子炉の安全技術 第2回作業部会へ提出されたソ連の宇宙用原子炉安全に関する技術資料はソ連が現在実行している安全技術のすべてとはいえないと思われるが、ソ連の現在の技術内容を示唆するものと思われる。以下にソ連の報告書⁶⁾の原子炉の安全に関する部分を要約する。なお、米国は原子炉に関しても前項アイソトープ電池に関する設計ガイドラインに相当するものを国連の科学技術小委員会の要請があれば資料として提出する用意があることを表明している。

原子炉動力源の放射線安全に関する問題 宇宙用原子炉は始動しない状態ではウラン・アイソトープからのアルファ線が少量発生するのみであり比較的安全であるが、原子炉が一度始動するとウラン235のベータ崩壊による放射線活動のため、放射線防護の立場から安全上の問題を提起する。

放射線の安全対策は宇宙用原子炉の製造、運搬、射場での打上げ作業と打上げ期間、軌道上、および宇宙でのミッション終了後のあらゆる段階で適切にされねばならない。製造から打上げまでの段階での安全確保の原則は人工衛星が予定の軌道上にのぼるまでは原子炉を始動しない、すなわち炉を臨界しないことである。

放射線安全上から最も重要な段階は、原子炉を搭載

した人工衛星が軌道上で軌道制御用燃料を消耗するか、または故障を起して人工衛星の軌道制御が不能になるときである。このような異常事態での安全対策は人工衛星の飛行計画に応じて異なる。ミッション軌道、高度、事故発生時の軌道高度、大気圏へ再突入するまでの軌道寿命、搭載原子力システム等が主要なものである。

低高度軌道の人工衛星では、原子炉を搭載した人工衛星をミッション終了後残留放射線量の寿命以上に相当する高高度軌道へ上昇するのが最も実現性の高い安全対策である。この軌道上昇に失敗して、地球大気圏に放射性物質を搭載したまま再突入するような事故が発生する場合には、安全対策としては次の二つの方法がバックアップとして用いられる。すなわち、

1) 再突入時の空力加熱による原子炉の破壊とウラニウム燃料の大気中への拡散

2) 原子炉心を化学薬品で溶解し、その溶解液を大気中へ拡散する。

大気中に拡散される放射性物質の濃度を許容値以下にする。

原子炉の空力加熱による破壊 大気圏に再突入する人工衛星とその衛星に搭載されている原子炉が空力加熱によって破壊されるプロセスは、構造表面に加わる空力加熱の熱流束、空気力による荷重、構造材料の熱特性によって決まる。再突入軌道上の運動、空力加熱、原子炉構造の破壊メカニズムを組み合わせで再突入時の空力加熱による破壊の状態を逐次計算機上でシミュレートすることはできる。ソ連においてはこの再突入状態の原子炉に関する理論的な研究が多くなされていると報告している。これらの理論研究では、次のような破壊に関する条件が考慮されている。すなわち、1) 燃料要素を炉容器に取り付けている部分の溶融と破壊されない燃料要素の分離に関するもの、2) 燃料被覆材と燃料容器が同時に溶融することによる燃料要素の破壊に関するものである。それらの理論研究では、炉心が溶融すれば燃料部が破壊し、燃料被覆材が溶融すれば燃料要素は破壊して、溶融物質は微細な液滴となって大気中に拡散するものと仮定している。

以上の理論に基づく原子炉燃料の大気拡散に関する計算は各種の実験によって確認される。それらの試験のおもなものは、1) 原子炉構造材の加熱による破壊のばらつきに関するデータの測定、2) 構造材を破壊する最低熱流束値の測定、3) 燃料要素の破壊率と燃料のアブレーション特性の測定、4) 破壊のモデルとしては、被覆材が溶融してから溶融しない燃料が飛び出してくるのか、または、被覆材の中で燃料は溶融しており被覆材の溶融といっしょに燃料の溶融液が飛び

出してくるのか、どちらのモデルで破壊するかを実験的に確認する。5) 空力加熱による破壊によって燃料は許容レベルの微粒子になりうるかを確認する。

大気中に散乱する燃料微粒子は、乱流拡散プロセスを仮定して地上に落下する粒子サイズを推定する。この結果を用いて、予想される汚染地区の被曝線量を算定する。

原子炉の化学薬品による破壊 この方法は、宇宙用原子炉が事故のため再突入する場合に、原子炉材料を化学薬品で分解して大気中へ拡散するものである。次の3種類の方法が考えられている。

1) 硝酸、硫酸、燐酸の混合液で原子炉材を溶解して、溶解液を連続的に大気中へ放出する。

2) 原子炉内を同上溶液をポンプで循環させて、溶液と溶解生成物を分離してから、溶解生成物を大気中へ放出する。

3) 臭素、塩素または弗素等の気体で原子炉材をガス化して大気中に拡散する。

溶液に必要な特性は、炉内で燃料を溶解しても、溶解液を大気中へ放出する路を形成している構造材料を溶解しないものが必要である。上記の硝酸、硫酸、燐酸の混合液はウラニウムやモリブデン等燃料コンボジットは溶解するが特殊なステンレススチールで作られた構造は溶解しない。上記1)の連続式溶解法では、溶解液中のウラン化合物の濃度は飽和点の0.5~0.7位の不飽和の状態で放出するが、2)の循環式溶解法では飽和点まで溶液を利用することができる。

各種の実験結果から、液体法が毒性上の問題と宇宙用原子炉に搭載して長期間保存するのに秀れている。液体による宇宙用原子炉の大気拡散技術を開発するためには、さらに、次のような研究が必要であるとソ連の報告書は述べている。

1) 最適反応液の混合配分を見いだす。

2) 反応液の原子炉内における流体力学的研究

3) 溶解液放出のメカニズムと宇宙の低重力環境における溶解のプロセス

4) 化学薬品による原子炉破壊システムの設計法

4. あとがき

本解説では、打ち上げられた原子力動力源を搭載する人工衛星に関する米国およびソ連の現状と、国連宇宙平和利用委員会科学技術小委員会原子力動力源の利用に関する特別作業部会に提出された米国およびソ連の報告書から、宇宙用原子力動力源の安全技術に関係する部分のみをまとめた。これらの報告書にある安全技術が確立されたものなのか、または国連へ提出されたたんなる可能性のある技術に関する調査報告にすぎ

ないかはいまのところ筆者には不明である。現在の国連では、原子力動力源搭載人工衛星の安全に関する討議が始まったばかりで、安全技術に関する国際的なガイドラインを設定するための討議を開始するまでも至っていない。国連宇宙平和利用委員会参加各国の大多数は、このような安全のための技術討議を続けてゆくことが宇宙における原子力動力源利用の安全確保のための合意点を得る、現状での最大のなしうることであると考えているのが現実の姿である。

本解説では紙数のため割愛したが、ICRP 勧告を宇宙用原子力動力源の放射線防護基準として適用するにはまだ解決されなければならない多くの問題があること、および人工衛星の軌道寿命と自然落下する原子力動力源を搭載する人工衛星の再突入軌道を精度良く予測するためには多くの問題が解決されねばならないこと等について、国連に提出されている文献 6), 8) ~ 17) は世界各国の研究成果として興味深いものであることを付記して文献リストのみを記載した。以下に掲げる文献は、著者が所有しており、閲覧に供することができる。

参考文献

- 1) United States of America: Uses of Radio Active (Nuclear) Materials by the United States of America for Space Power Generation, United Nations, A/AC. 105/L. 102 (1979).
- 2) Retombée du satellite «Cosmos 954» AIR ET COSMOS, No. 704 (4 fév. 1978), pp. 30-33.
- 3) Report of the Working Group on the Use of Nuclear Power Sources in Outer Space, United Nations, A/AC. 105/238 (1979. 2. 16).
- 4) Annals of the ICRP, ICRP Publication 26, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press (Jan. 17, 1977).
- 5) United States of America: Criteria for the Use of Nuclear Power Sources in Outer Space, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 8 (23 Jan. 1980).
- 6) Union of Soviet Socialist Republics: Solution of the Problem of Radiation Safety, Application of ICRP Recommendations, Assessment of the Present Methods of Orbital Mechanics, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 10 (25 Jan. 1980).
- 7) Report of the Working Group on the Use of Nuclear Power Sources in Outer Space on the Work of Its Second Session, United Nations, A/AC. 105/C. 1/L. 120 (12, Feb. 1980).
- 8) Canada: Summary of "Operation Morning Light" Search and Rescue Operation, United Nations, A/AC. 105/C. 1/L. 106 (25 Jan. 1979).
- 9) United Kingdom: Predicting Satellite Re-entry, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 4 (22 Feb. 1979).
- 10) Japan: List of Safety Problems, Effect of Radiation from Nuclear Power Systems Built in the Spacecraft on Populations and the Standards of ICRP, Note on Satellite's Orbit and Re-entry, Format of Notification, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 5 (28 Dec. 1979).
- 11) Sweden: On Technical Aspects and Safety Measures of Nuclear Power Sources in Outer Space, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 6 (10 Jan. 1980).
- 12) Canada: Radiological Hazards and the Use of Nuclear Power Sources in Outer Space, Recent Canadian Progress on the Prediction of Satellite Orbit Lifetimes, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 7 (11 Jan. 1980).
- 13) United States of America: Potential Improvements in Predicting Re-entry Phenomena, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 9 (23 Jan. 1980).
- 14) United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland: Safety of Nuclear Devices in Satellites, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 11 & Add. 1 (28 Jan. 1980).
- 15) India: On Technical Considerations Related to a Format for Notification of the Launch/Re-entry of Space Objects Containing Nuclear Power Sources, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 12 (28 Jan. 1980).
- 16) France: On the Application of ICRP Recommendations in the Case of the Use of Nuclear Power Sources in Outer Space, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 13 (29 Jan. 1980).
- 17) Canada: Format of Notification for Space Operation of Nuclear Power Sources, United Nations, A/AC. 105/C. 1/WG. V/L. 14 (30 Jan. 1980).

乱流予混合火炎*

吉 田 亮**

1. ま え が き

航空機あるいはロケットから自動車にいたるまで、そのほとんどが動力を得るために、さまざまな形態の

燃焼現象を利用している。代表的な例として、ガスタービン燃焼器内の燃焼のような連続的なものと、往復動内燃機関のような間欠的な燃焼をあげることができる。しかし現象論的にこれらを分類するともっと複雑になる。予混合火炎であるか拡散火炎であるか、あるいは層流火炎であるか乱流火炎であるかの組み合わせにより4通りの燃焼現象が存在するわけで¹⁾、それぞれ

* 昭和55年7月8日原稿受理 Turbulent Premixed Flames

** 東京電機大学工学部 Akira YOSHIDA