宇宙・海洋開発におけるアイソトープ・放射線利用[†]

加 藤 正 夫

東京大学・生産技術研究所

1. ま え が き

宇宙ならびに海洋開発へのアイソトープまたは放射線の利用に関する研究は、おもにアメリカを中心に行なわれてきた。すなわち宇宙開発面では「宇宙科学へのアイソトープ利用」に関するシンポジウムが、1966年2月Dayton¹⁾において、また1967年7月Columbus²⁾において開催され、応用計測器、熱源としての利用、ラジオグラフィ、分析、トレーサーなど、いままでのアイソトープ利用技術を取り入れた応用例のほかアイソトープ線源や半導体検出器に関する研究成果などが発表された。

一方、海洋開発面では、早くから天然アイソトープや核爆発にともなって生成したアイソトープをトレーサーとして利用した、海水の移動、海底沈殿物の年代測定や沈降速度の推定などが行なわれてきた。また放射性砂によって海底の砂の移動を調べる漂砂の実験もわが国をはじめ数多くの国々によってとりあげられてきた。近年海洋資源の利用開発が叫ばれるにおよび、アメリカにおいていくつかのアイソトープ利用計測器が開発され、すでに2,3年前から実用化試験も行なわれている。

さらに宇宙や海洋開発にさいし、必要な熱源や電力源としてアイソトープを利用する研究をあげておかなければならない。宇宙利用では人工衛星用電源として早くから実用化されてきたが最近ではアポロ計画に従って月面上にも設置されている。海洋利用においてもビーコンやブイの電源だけでなく潜水夫の保温や海中エンジンへの利用なども計画されている。

以下に特徴的なアイソトープ利用に関し、宇宙、海洋、エネルギーの3つに分けてやや詳しく述べてみよう。

2. 宇宙開発への利用

2・1 応用計測器

2・1・1 大気密度計および高度計

大気密度計としては β 線(^{14}C , ^{147}Pm など)の前方散

乱を利用する方式³⁾のものもあるが、 γ 線またはX線の後方散乱を利用する方式が開発された。 γ 線源としては ^{144}Ce や ^{75}Se のように100~300keVの γ 線放射体が用いられる。

^{144}Ce 25Ciを用い、4 in. ϕ ×2 in.のNaI(Tl)の中央をタングステンで仕切り半分を散乱 γ 線用に、残りの半分をBG検出用にし、高度大となって散乱 γ 線が低減したときにBGのさし引きができるようにくふうした場合に、ほぼ67km($\sim 2 \times 10^{-4}\text{kg/m}^3$)まで測定できる(図1参照)。

図1 ロケットにのせた大気密度計の実測値

^{75}Se 1 Ci, 2 in. ϕ のNaI(Tl)を用いた密度計は、校正線源 ^{241}Am と小型CsIを組み合わせたものを同一のシンチレータに取りつけて利得制御を行ない出力の安定化をはかっている。また温度特性を改善するため検出部分を一定温度におさえている。実測結果によれば、7,625mまで $\pm 0.5\%$ 、30,500mで $\pm 10\%$ の誤差があった。

X線密度計は宇宙船が地球や他の天体に着陸するときの制御を目的に開発されたもので、三極X線管とドライアイスで冷した12個のSi(Li)検出器とからなり、衝撃波の外側から後方散乱してくるX線を検出するような配置になっている。 $\pm 5\%$ の確度で91,000mまで連続的に測定可能である。

[†] Nucleonic Application in Space and Ocean. Masao KATO: Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Roppongi, Minato-ku, Tokyo.

X線の後方散乱を利用して視界がきかないときでも高度や地形を判読できる計器が設計された。パルス状にX線を放射しそれが地表から反射して戻ってくる時間を測る方式のもので、高さ15mで±0.15m, 91mで±0.6mの誤差である。雨や雪による誤差は無視できる程度であり、コンクリート、砂、水などの地形の判読もできる。15gまでのショックや-62～371°Cの外温に耐えるよう頑丈に組み立てられている。

2・1・2 Fuel gauge

各種の gauge が開発されているが、大別すると mass sensitive な方法と volume sensitive な方法になる。前者は燃料と相互作用した γ 線の検出方法によって、一次 γ 線のみ検出するもの、散乱線のみ検出するもの、両者をふくめて検出するものの3つに分けられる。線源としては ^{241}Am , ^{85}Kr , ^{137}Cs などが用いられるが、検出器には使用条件いかんによりGM管、シンチレーター、アルゴンガス入り電離箱、半導体検出器を用いたものがある。図2は宇宙船の球状燃料タンクに装着した場合を示したものである。一例をあげれば ^{85}Kr 4 mCi と GM 管を組み合わせて通常飛行時には3%, ピッチング±20度, ローリング±2度の場合でも6%の誤差で測定でき、-54～+232°Cの範囲まで使用に耐えるものもある。

図2 宇宙船用燃料タンクのゲージシステム

燃料タンク内の容積の変化を検出する方式のものとしては、shadow方式、トレーサー方式、logic方式の3つがある。shadow方式とはたとえば線状の線源と検出器を対向させて燃料中に入れておき両者間に液体が存在するときには放射線が吸収されて検出されず、気体が存在するときのみ検出するようにしたものである。

トレーサー方式はあらかじめ液体または気体状の放射性トレーサーを注入しておいて放射能の減り具合から液体の量を測定するもので、一般に ^{85}Kr ガスが用いられている。logic方式は線源と検出器からなる多数

の検出部をタンクの周囲に配列し、あらかじめ設定してあるレベル以上の放射線を検出する検出部の数から気体の容積を求めるものである。

2・1・3 Cryogenic quality gauge

蒸気だけでなく液体水素まで放出されているかどうかを調べる目的で水素の相対的質量を測るゲージである。液体と気体の水素質量を m_l , m_g とすればその品質 q は

$$q = mv / (m_g + m_l)$$

この q を求めるのであるが、混合水素および気体状の水素の密度を ρ_a , ρ_v とすれば近似的に次式で表わされる。

$$q \approx \rho_v / \rho_a$$

上の2つの式の分母を β 線(^{90}Sr , ^{204}Tl)または γ 線(^{241}Am)の透過を利用して測定し、分子を圧力計から求め、それらの出力を演算回路に入れて q を算出する。この品質計の測定精度は±5%以内で十分使用に耐える。最近では圧力計の代わりに α 粒子の吸収を利用したゲージで置きかえる研究が行なわれている。

2・1・4 LH₂ Local density meter

飛行中に燃料の上部が低密度となる層状の密度分布を呈し、このため燃料の推進効率が低下する場合がある。これを検査する密度計でコリメータなしの ^{90}Sr 15mCiと表面障壁型のシリコン検出器からなり、1秒の計数時間で0.1%の誤差で密度測定ができる。

2・2 分析

2・2・1 中性子放射化分析

中性子は物質と相互作用し、非弾性散乱 γ 線、捕獲 γ 線、放射化 γ 線の3つの過程で γ 線を放出させる。これらの γ 線をそれぞれ選別計数すれば3つの γ 線スペクトルが得られ、数多くの元素分析ができかつ感度も上昇する。

中性子源としてはパルス中性子発生管のほか ^{252}Cf が注目されてきた。前者は(D, T)反応を利用し、14MeVの中性子をパルス幅5～100 μs , 繰返し1,000サイクル程度で発生させ、10⁹n/sec程度の中性子出力を得るので、月面の分析に用いるための研究が行なわれている。図3はその一例で、中性子照射後180°回転して γ 線を検出するものである。またアポロ計画に従って持ち帰った月面試料の分析に14MeVの中性子放射化分析法が偉力を発揮したことは、Apollo 11 Lunar Science Conf.の論文集⁴⁾に詳しく述べられている。

この論文集には年代決定、微量元素分析、主要元素の存在%, 安定同位元素と希ガスおよび太陽嵐や破砕による生成物、鉱物学、特殊鉱物研究、微粒子やガラス状のものおよび衝撃効果、メスバウア研究、電気的

図3 中性子発生装置ならびに γ 線測定装置

磁気的性質、その他の物理的特性、有機化学、概論の12部門約140余編の論文が収められており、その半数以上がアイソトープ・放射線利用に関連がある。

2・2・2 メスバウア効果の利用

オングストロム領域のきわめて微小な振動振幅の変位を測定するのに ^{57}Fe でみられるメスバウア効果が最適である。周波数 10^6 サイクル以上、速度 $0.01\sim 8.4\text{ mm/sec}$ で動作する小振幅校正装置が作られた。振幅でいえば $1\text{ \AA}$ 以下に相当し現在使用されている光学干渉計の限界以下まで測定できる。

メスバウア効果は高速度タービンのような回転体の真の回転からの微小変位の検出や分子レベルでの環境の変化を検出して金属中の歪や疲労の研究、試料中の元素の化学的形状の分析、温度、圧力、振動周波数などの物理的パラメータの変化測定等々、多くの利用が考えられ、今後の研究が期待される。

2・2・3 ガスモニター

宇宙飛行士にはたえずきれいな空気を補給しなければならない。このためには CO_2 ガスのみならず宇宙船内で使用されている各種物質から放出されるおそれのある Cl_2 , SO_2 , F_2 などの有害ガスの検出と制御が重要である。

Gemini号の環境制御用として開発された CO_2 ガスモニターは海底ハウスへの応用も考えられ、図4のように空気のパイプを2つに分け一方を CO_2 ガスを除去したのち校正用電離箱に導き、他方はそのまま同じ形状の電離箱に入れる。両電離箱をふくめてブリッジ回路を形成し、 CO_2 ガス量に比例した電流が流れるようになっている。0～20mm Hgの CO_2 に対して0～5

図4 炭酸ガスモニター

Vの読みが得られ、実験室での確度は $\pm 0.2\text{ mm Hg CO}_2$ で、 $10 \times 8 \times 6\text{ cm}^3$ 程度の小型ケースに組み込まれている。

有害ガス監視用のモニターは、放射性ガスとして ^{85}Kr をハイドロキノンに包接させた物質と分析すべき有害ガス成分とが化学的に反応し、その結果反応量に比例して放出される放射性ガス(^{85}Kr)の放射能を測定して間接的に有害ガスを分析する方式のものである。 F_2 , Cl_2 , ClF_3 , SO_2 , NO , NO_2 , RNH_2 , O_3 などのモニターに適用することができ、大低の場合0.5ppmまで検出する。この装置によってロケット燃料や酸化剤から生成する有害ガスのモニターができるようになった。

2・3 トレーサー

前節の ^{85}Kr ハイドロキノンはいわゆるクリプトネートと称されるもので、 ^{85}Kr イオンを高速度でクリプトネートすべき物質に衝撃させて作るかまたは、高温度高圧力で ^{85}Kr ガスと物質を接触させて作る。たとえばこうして作られたクリプトネート銅ハクの場合、30分以上 903°C (1083°C が融点)で加熱してみてもはじめの放射能の75%以上が保留されている。

クリプトネートはまず表面でおこる物理的・化学的反応によって ^{85}Kr を放出するので、その反応の程度を ^{85}Kr の放射能を測ることによって知ることができる。こうして酸化・腐食・摩耗などをしらべる手段にも役立つ。また前述のガス分析をはじめ、接近しかねる部品の温度分布測定などにも利用できる。

2・4 ラジオグラフィ

宇宙航空分野では小型で携帯でき部品内部へ挿入可能なラジオグラフィ線源が望まれる。また構成物質が軽元素を主としているので軟X線源で十分である。わが国でも ^{192}Ir による航空機エンジンの非破壊検査が実施されているが、 ^{170}Tm , ^{241}Am , ^{155}Eu , ^{153}Gd , ^{148}Sm , ^{125}I などのX・ γ 線源のほか ^{85}Kr , ^{147}Pm などの β 線

励起X線源をも利用する研究が行なわれている。

中性子ラジオグラフィはゴム・接着剤・燃料などの含水素物質の検査に有効である。このため小型の中性子線源の開発が望まれ ^{252}Cf が注目されてきた。 ^{252}Cf は $^{124}\text{Sb-Be}$ に比べると体積で $1/200$, 1 Ci あたりの中性子数 $4.4 \times 10^9 \text{ n/sec}$ で $^{124}\text{Sb-Be}$ の440倍に相当する。

2・5 Radioluminescent materials⁵⁾

^{147}Pm を小型の inert beads の形に封じた radioluminescent material (R/L 物質) は, Lunar Module のドッキング用標的として実用されている。この標的は直径約45cmの円環状に約40個のボタン状の発光体を並べたものである。製造時は1フィートランパートの明るさであるが、温度効果もふくめて1年後の -184°C の宇宙空間ではほぼ $1/2$ に低下するものと考えられている。約60m以上離れたところからも十分に識別できる。

このR/L物質は宇宙船内の各種計器の操作つまみの先端に小さな穴をあけて埋め込んでその位置とON-OFFを表示するほか、着陸地点の標示灯にも用いられている。Lunar Moduleの計器のうち125個ほどのつまみにR/L物質が用いられているとのことである。

2・6 Ranging, Guidance

霧や雪などで視界がきかなくとも飛行でき、かつ所定の場所に荷物を落下させたり垂直離着陸ができるように、 ^{60}Co , ^{137}Cs などの γ 線源を利用する方法である。図5(a)(b)はその一例である。 ^{60}Co の γ 線は煙や霧による減衰が0.5%程度で問題ないが、かなり多量の線源を用いねばならないので飛行士の放射線被曝量が増大する。これをさける方法としてパルス状にX線を発生する装置も開発された。

図5 (a)盲目着陸できる

X, γ 線の検出方法としては、図6のようにシンチレーターのまわりに入射 X, γ 線 の方向をきめること

図5 (b)盲目飛行で目的地に荷物を落下できる

のできるコリメーターつきしゃへい物を回転させる方式とか、薄い同心円柱状シンチレーターを4等分し、対向シンチレーターの出力差の和と差とから線源の存在する方向の縦軸と横軸を表示させる方式とかを用いている。

(a) 回転コリメーターによる方法

(ライトパイプの下に4個のホトマルをおいて検出)

$$(D_1 - D_3) + (D_2 - D_4) = B \sin \theta$$

$$(D_1 - D_3) - (D_2 - D_4) = B \cos \theta$$

(b) オッシロに直接表示させる方法

図6 X, γ 線 の方向検出法の一例

3. 海洋開発への利用^{6),7)}

3・1 トレーサー利用

天然アイソトープを利用する海底沈殿物の研究、核爆発および原子炉冷却水にもなって海洋に混った人

工アイソトープをトレーサーとする海水の移動や混合の研究, 人工アイソトープ砂による海底漂砂の研究などが早くから行なわれてきた。

一例をあげれば, Thの海水中の滞留時間を35年程度とし, ^{230}Th と ^{232}Th とが化学的に同一分布をなしているとしても比が一定であるとすれば, 海底沈殿物の表層10cmの沈殿速度が年 10^{-3}mm となることを明らかにした論文や, ^{26}Al の放射能を測定して同じ沈殿物の沈殿率を求めたもの, 海底の岩石や地殻の年代決定に ^{32}Si , ^{14}C , ^{234}U , ^{231}Pa などを利用したものなどがあげられる。

また水深2~300mのところに温度と密度の転移層が存在し, それ以下の深海水との混合がさまたげられている。核爆発で生成した ^{90}Sr などの分布状態をしらべることによって, 表面水と深海水との混合過程を明らかにすることができる。もちろんこの場合個々のアイソトープの化学的性状とその特性, 海域の一般状況や季節的な変動など各種の要因をも考慮しなければならないことはいうまでもない。

海底漂砂の追跡に関する研究は1954年以降筆者らをはじめとして国内でも数多くの実験が行なわれてきた。表1はその一覧表で, 当初は ^{65}Zn , ^{60}Co などを用いてアイソトープガラス砂を製造していたが, 最近では非放射性の主として ^{45}Sc を含むガラス砂を作りこれを原子炉に入れて放射化し ^{46}Sc ガラス砂として用いている。1回の使用数量も数100mCiまで用いられるようになった。諸外国においても同様に作った ^{46}Sc ガラスを用いる場合が多いが, 現地砂にアイソトープを付着させたものも用いられている。

3・2 応用計測器

3・2・1 Deep water isotopic current analyzer (DWICA)

深海流, すなわちきわめてゆっくり移動する海水の流速と流向をその場で測定する目的で作られたものである。16個の検出器を図7のように直径60cmの環状に配列し, その中心から ^{131}I 約1 μCi を放流し, どの検出器の近くを何分後に放射性水塊が通過したかによって流速流向を算出する方式のもので水深1,800mまで使用できる。

このほかに密封小線源を羅針盤のNS成分およびEW成分上にとりつけ, 海水流速ベクトルに比例する電流を発生させそれから求める方式のものも開発されている。この方式はアイソトープを放出する必要がなくまた使用線源も法規外の少量で間に合う特長をもちオ

表1 わが国における海底漂砂実験一覧表

実験場所	実験年代	使用アイソトープ	1回の使用数量(mCi)	測定器
苫小牧	1954~55	^{65}Zn	14~32	シンチレーション
	1956~61	^{60}Co	5~20	GM管
	1962	^{46}Sc	8	シンチレーション
皆生	1957	^{65}Zn	50~60	GM管
	1958~59	^{46}Sc	50~60	〃
伊良湖	1957~58	^{60}Co	2~19	〃
福江	1959~60	^{60}Co	3~6	〃
	1961	^{46}Sc	5	〃
磯浜	1960~61	^{60}Co	2~35	〃
鹿島灘	1962~63	^{60}Co	30~60	〃
	1962	^{46}Sc	10~60	〃
新潟	1959	^{65}Zn	80	〃
	1961	^{60}Co	20~230	〃
	1962	^{46}Sc	80	〃
	〃	^{60}Co	10~60	シンチレーション
釧路	1963	^{46}Sc	10~50	〃
酒田	1964	^{60}Co	~500	GM管 シンチレーション
大熊海岸	1964~65	^{46}Sc	20~200	シンチレーション
	1965	^{140}La	20	〃
	1965	^{192}Ir	10	〃

図7 深海水の流向流速測定原理

ンタリオ湖の実験では, 約6週間の連続使用に耐えた。

3・2・2 溶存酸素計⁸⁾

海水中の酸素含有量は海洋生物にとってきわめて重

要な要素である。したがって海洋生物の生産性の向上をはかるには溶存酸素量を測定してコントロールしなければならない。この目的で放射能遊離分析法にもとづく溶存酸素計が開発された。この分析法はある物質を分析するのにその物質と化学的に反応する放射性試薬を加え、化学反応の結果放出される放射性物質の放射能から間接的に目的物質を定量する方法である。この場合の反応式は

1968年1月水深下250mに沈めてテストを行なった結果いくつかの改良を施し、現在1,000mまで使える自動測定装置をめざして研究が行なわれている。写真1はその外観図で、約2mCi/gの比放射能の ^{204}Tl を用いた場合0.2ppmまで測定可能である。

写真1 ^{204}Tl 溶存酸素計

3・2・3 温度・圧力計をかねた水中検出器⁸⁾

水中の放射能を5 in.φ×5 in.の大型NaI(Tl)で効率よくγ計数する装置が作られすでに使用されているが、この場合測定か所の水温、水圧も同時に読みとれば好つごうである。この目的で図8のようにNaI(Tl)のまわりに水温、水圧検出部をとりつけたものが

図8 温度計圧力計をかねた水中放射能検出器

開発された。

いずれも水中放射能からのγ線スペクトルを乱さないように、低エネルギーのX、γ線源を用いて検出部を構成している。すなわち温度検出部には0.01μCiの ^{204}Tl (77keV KX線)を用い、0.63mm厚さのスチール窓を通してNaI(Tl)に入射するようになっている。±0.6°Cの誤差で測定できる。圧力検出部は1μCiの ^{57}Co (122 keV)をBourdon管にとりつけたものを用い、300ftでは±2ft、6000ftでは±30ftの誤差があった。いずれも10分間計数結果であるが、温度計では温度が平衡に達するまでさらに10分間の余ゆうを見る必要がある。

3・2・4 Suspended-sediment meter⁹⁾

いままでの測定法では懸濁液の流れをかき乱すため好ましくない。これに対し低エネルギーのγ線の透過を利用した懸濁液濃度計はそのような欠点がなく、 ^{109}Cd または ^{241}Am 線源とシンチレーション検出器を対向させ、その間に懸濁液を流しγ線の吸収度から濃度を読みとるものである。もちろん流速や懸濁物質の成分などの影響をうけるのでその補正を行なう必要がある。感度はほぼ500ppmまでで、数日間の連続測定に耐える装置の研究が行なわれつつある。

3・2・5 Sediment density meter

海底沈殿物の密度測定はcore sampling法によらざるを得なかったが、γ線密度計が開発されてから従来は水深4,500mまでであったのが6,000mまで調査できるようになった。またcore法では1日8時間として4～5か所しか採取できなかったが、γ線密度計によれば約60か所の測定が可能である。こうして時間、経費ともに大幅に節約できるようになった。

後方散乱型の密度計は図9に示すように重量700ポンドの植状のもので、上部は6 in.φ×5 ftの円筒で電池を内蔵し、下部は3.5 in.φ×20 ftの円筒で、先端から15 ftまでの部分に ^{137}Cs 100mCi、30本のGM管、エレクトロニクス、レコーダーなどを収容してある。

この密度計は自重によって沈みその先端が海底につくとマグネットスイッチが働いてモーターが始動する。こうして下のほうから2 ftずつ10秒間の計数値、傾斜計のよみ、時間を8 mmフィルムに撮影記録していく。下から12 ftまでしか測れないので7回の測定が終るのに約8分かかる。

透過型のもは写真2に示すように2本の棒のうち一方には ^{137}Cs 、もう一方にはシンチレーション検出器を入れ、両者間の透過γ線を記録して密度を求めるものである。全体が1つの塔状に組み立てられており、

図9 後方散乱型海底密度計

写真2 透過型海底密度計

これを海中にゆっくり沈める。海底に達すると2本の棒はゆっくり上方にもちあがっていくようになっており、この間10ftの距離を0.5in.ごとに測定するので後方散乱型よりも詳しい密度分布がわかる。

3・2・6 海底物質の自動分析装置¹⁰⁾

14MeVの中性子放射化分析装置を船に積んでいき測定現場でサンプルした試料をただちに分析する方法

からさらに一步前進させて分析装置を海底に沈める方法が検討されている。この場合の中性子源としては検層用に開発されたパルス状中性子発生管を用いるかアイソトープを用いるかである。

すでに述べたように ^{252}Cf は少量で多数の中性子を発生するのでこの種の目的には最適である。表2は ^{252}Cf の核特性である。この ^{252}Cf を中性子源として海底岩石に中性子を照射し、生成する即発捕獲 γ 線をGe(Li)半導体検出器で検出し、非破壊分析する装置が考案されている。

表2 ^{252}Cf の核特性

半減期	2.646 $\pm$ 0.004年
壊変 α 崩壊	2.731 $\pm$ 0.007年(51.1%)
自発核分裂	85.3 $\pm$ 0.5年(48.9%)
中性子数/自発核分裂	3.76
中 性 子 密 度	2.34 $\times 10^{13}$ n/sec/g 4.4 $\times 10^9$ n/sec/Ci
中性子平均エネルギー	2.348MeV
γ 線放出率	1.3 $\times 10^{13}$ photon/sec/g (CmLX線) 140R/hr/g at 1m

通常の放射化分析法は、海水中のナトリウムや塩素から生成する大量の誘導放射能に妨害されて微量分析

図10 (a)海底物質分析装置の概念図

図10 (b)海底物質分析用潜水艇の概念図

表3 宇宙用の SNAP アイソトープ発電器

SNAP No.	出力電力 (W)	RI	使用目的	現 状
3	2.7	^{238}Pu	航海用衛星	1961年6月打上げた、作動中
9 A	25	//	//	1963年9月, 12月: 打上げ, 作動中, ただし衛星は動作停止
11	25	^{242}Cm	月面検査 (寿命90日のため実際は使われなかった)	1966年7月燃料装着, 1966年10月 90日のテストをおわる
19	25	^{238}Pu	Nimbus III 気象衛星	1969年4月打上げ軌道にのって作動中
27	63	//	アポロ月面実験用, 月面に設置	1968年に5台 NASA に譲渡。アポロ12号により, 1969年11月19日月面に設置, 作動中
29	200~1,000	^{210}Po	宇宙利用	開発中
Radioisotope (Brayton)	5,500	^{238}Pu	人間衛星用	AEC は熱源, NASAは変換部を開発中
Transit generator	30	//	航海衛星	出力電力のより大きいものを開発中
Pioneer generator	120	//	Jupiter 探査 (1972~73)	SNAP 19 を修正したもの評価中
Viking generator	60	//	1973年月面用	同上

が不可能となるために捕獲7線を用いるのである。すでに海底環境を再現させて金やマンガンなどを分析する基礎的実験が成功裡に行なわれている。図10(a), (b)は海底に沈めて分析する装置と2人乗りの分析用潜水艇の概念図である。

4. エネルギー利用

4・1 アイソトープ発電器⁽¹⁾

表3に示したように1961年6月航海衛星用の電源として2.7WのSNAP-3が打ち上げられてから, SNAP

写真3 アポロ12号から ^{238}Pu 燃料を月面上のアイソトープ発電器へ移しかえている。

9 A, 19 などがあいついで打ち上げられ, アポロ計画に従って昨年11月19日月面上に SNAP-27 が設置された。その歴史的なひとコマが写真3で, Gordon Bean氏が ^{238}Pu 熱源を容器からとり出して足元にある SNAP-27 発電器に移しかえるところである。移しかえてからショート棒を取りはずせば73Wの電力が発生する。SNAP-27 は6つの実験と ALSEP (Apoll

写真4 SNAP-21 をカリホルニア州ロングビーチ近くの海底150 ft に設置しているところ。

Lunar Surface Experiments Package) のデータを送信するために用いられている。

海洋開発面では SNAP-7 クラスの発電器が各種の海洋条件下で十分に耐えることが証明され、1966年に SNAP-7 に関する研究を終了した。米国 AEC では引きつづき SNAP-21 と 23 (10~100W) の研究を開始した。これらの全効率は初期のものの 2 倍に近くほぼ 6.5~7% で、信頼性、寿命ともにすぐれている。

SNAP-21 は 10~20W の ^{90}Sr を用いた発電器で、10W のものの海洋テストは 1969 年 6 月以降開始された。写真 4 はその取付作業を行なっているところである。現在 20W のものの設計を行なっている。

SNAP-23 は同じく ^{90}Sr を燃料とするが SNAP-21 より電気出力が大きく、60W のものが 1968 年 12 月以降テスト中で、その製造組立て作業は 1970 年 1 月に完了した。このほか 25W や 100W のものも計画されている。

なお、ブイや灯台の電源、通信用ケーブルの中継器用電源などへの応用研究は英、仏、ソ連などでも行なわれており、海底ハウスが建設されたり海洋開発が進展するにつれて有力な電源の 1 つとしてますます脚光を浴びつつある。表 4 は海洋への利用を目的とした各国のアイソトープ発電器の開発現状である。

4・2 熱的利用

人工衛星・飛行体内の計測器や電池および潜水夫などの保温に利用することができる。写真 5 は潜水夫の保温用温水循環器のテストをしているところで、重量 15 ポンドで長時間の使用に耐える。従来の保温用電池は重量が倍以上で 3 時間しかもたず、その後 18 時間充電する必要があった。また図 11 は ^{238}Pu を燃料とするカプセルを銀亜鉛電池の保温に用いた場合のものである。

表 4 海洋利用アイソトープ発電器の開発状況

国 名	名 称	電気出力 (W)	アイソ トープ	用 途	現 状
ア メ リ カ	SNAP-7A	10	^{90}Sr	航路標識灯	1964 年 1 月カーチス湾へ設置 1966 年 8 月テストのため回収
	SNAP-7B	60	^{90}Sr	灯台	1964 年 5 月チザビーク湾に設置
	SNAP-7E	7.5	//	海底ビーコン	1964 年 6 月大西洋に設置
	SNAP-7F	60	//	海中油田プラットフォームの補助ライト	1965 年 7 月メキシコ湾に設置し、 10 月回収
	SNAP-21	10	^{90}Sr	深海洋発電器	1969 年 6 月サンクレメント島の海洋に設置
	SNAP-23	20~100	^{90}Sr	灯台	60W のもの 1968 年 12 月以降試験中
英 国	ナ シ	5	^{137}Cs	深海地震計	設計中
	RIPPLE- IV	2.5	^{90}Sr	海底ケーブル中継器	設計中
	// V	1	//	航海用ライト	1966 年 7 月以降実験室で運転中
	// VI	1	//	//	1966 年 8 月以降実験室で運転中
	// VII	1	//	//	1966 年 8 月から実験室で運転中
フ ラ ンス	ITR(RIPPLE)	4	//	航路標識	市販用
	Marguerite	0.04	//	海底ビーコン	
	Marguerite II	0.125	//	航路標識	地中海カンヌ沖合に設置 (1968.2.21)
	// 20	30	^{210}Po	海底油田警戒保安装置用	開発中
E N E A	GISETE 5	12 or 20	^{90}Sr	石油採掘電気装置用	200m 海底用
	MASTODON-1	1~10kW	^{90}Sr	模型	(スターリングサイクル)
	// -2	10~100kW	//	推進用プロトタイプ	(スターリングサイクル)
日 本	ナ シ	3	^{90}Sr	航路標識用	(日立中研 1 号機)
スウェーデン	RIPPLE-IV	1	^{90}Sr	//	1967 年以降テスト中
カ ナ ダ		5	^{60}Co	陸上または海用	開発中

写真5 潜水服保温用温水循環器のテストをしている。

蓄電池ケース

燃料容器

止め金

可動ハンドル

図11 銀亜鉛電池の保温用 ^{238}Pu ヒーター

1969年6月20日アポロ11号によって2台の15Wの熱出力の ^{238}Pu ヒーターが月面に運ばれた。これは地震計の保温に用いたもので、外気温が -250°F まで降下しても -60°F 以上に保つことができる。地震計は短時間うまく動作したがその後部分的に作動中で、12月現在はエレクトロニクスはなお動作中であるが記録計が故障している。

さらに宇宙船内の居住性制御の1つとして汚水浄化装置にも利用されている。図12はその1工程である真空蒸発器で 210W_{th} のアイソトープヒータを用いる。

海洋開発の一端として海中エンジンの熱源として利用する計画が進行している。RISE (radioisotope submersible engine) の概念設計も行なわれ、それによると熱源としては比出力の大きい ^{60}Co を用い、Rankine

cycle で動力変換する方式になっている。

図12 真空蒸発装置（汚水浄化装置の一部）

5. あとがき

以上に述べたように宇宙ならびに海洋開発における利用度は非常に高いものである。しかもこれらはいま始まったばかりと考えてよいのであるから、今後に期待される潜在的効用性は想像を絶するものというべきであろう。この拙文がわが国における今後の進歩になんかの役に立ち得れば著者の望外の幸である。

文 献

- 1) Radioisotopes for Aerospace part 1, part 2, Plenum Pub. Co. (1966)
- 2) Nucleonics in Aerospace, Plenum Pub. Co. (1968)
- 3) B. Sellers, et al.: *Int. J. Appl. Rad. and Isotopes*, **20**, (5) 341~51 (1969)
- 4) Proceedings on Apollo 11 Lunar Science Conf., *Science*, **167**, (3918), Jan. 30, (1970)
- 5) T.N. Lahr: *Isotopes and Rad. Tech.*, **7**, (1) 64~67, Fall, (1969)
- 6) R.A. Pedrick, et al.: *Nucleonics*, **24**, (6) 42~44 (1966)
- 7) G.H. Keller: *Isotopes and Rad. Tech.*, **6**, (4) 376~81, Summer (1969)
- 8) Research and Development Projects-1968, TID-24823, USAEC, Jan. (1969)
- 9) C.A. Ziegler, et al.: *Int. J. Appl. Rad. and Isotopes*, **18**, (8), 585~93 (1967)
- 10) Californium-252 Progress, No. 2. p. 28, Jan. (1970)
- 11) USAEC Annual Report to Congress of the Atomic Energy Commission, Jan. (1970)