資 料

核 爆 発 の 平 和 利 用

今 井 隆 吉*

(1968年 7月19日 受理)

Peaceful Uses of Nuclear Explosion

By Ryukichi IMAI

The history, outline of the basic technology, and the major contemplated uses of AEC's Plowshare project are described. The article points out the major safety problems involved, such as the tritium level in recovered natural gas (measurements by LRL of the Gasbuggy experiment), and activity release from nuclear excavation (project SEDAN data). Drawing information mostly from publicly available data, the article concisely outlines this newly emerging technology, its scope and its economics. The reason for the sudden increased of public interest in this subject is ascribed to the recent international discussions on the free access to this technology, which has finally culminated in the Article V of the Non Proliferation Treaty.

I. は し が き

核爆発の平和利用という命題がとり上げられるようになったのは1963年頃からである。いわゆる軍事科学の波及効果(Spin Off)ということがアメリカでやかましくいわれるようになり、原子力の分野では、発電やアイソトープ利用と並んで、核兵器そのものの利用法を開発できないだろうかという考えが生まれるようになった。「きれいな水爆」といわれる、核分裂生成物質が少量しか付随しない核融合兵器が登場したことも大きな理由となっている。

この年からアメリカ原子力委員会はPlowshare計画と名づけて予算をとり、主として Rivermore の LRL (Lawrence Radiation Laboratory)を中心に開発に手掛けるようになった。もちろん、それまで地下で核兵器実験を行なって来た実績がものをいっているわけである。しかし、何ととっても、核兵器の平和利用というのは、話題としてあまりにも生々しいものであるだけに、どちらかというとアメリカが「いいわけ」の手段として始めた仕事と受け取られ勝ちで、積極的な将来性を持つ技術にまで発展するものとして考えられていなかったように見受けられる。

このような事態を変えるような要因が最近になって

いくつか発生した。

第1表 U.S. AEC のブラウシェア予算

会 計 年 度	単位千ドル
1963	9,536
1964	12,491
1965	10,678
1966	14,605
1967	15,700
1968	19,500
1969	17,000

- (1) 核拡散防止条約の論議を通じて核爆発の平和利用の技術的将来性がクローズアップされ、遂には条約第5条の中で正式に認識されるようになった。
- (2) コンパクトな形から極めて多量なエネルギーをリリースすることができ、しかもエネルギー価格が極めて安価であるという事実が一般に強調されるようになった。
- (3) 1967年秋アメリカで行われた「ガスバギー計画」の実験がおおむね成功であり、かつ心配されたトリチウムの検出レベルがかなり低そうだという結

* 日本原子力発電(株) (Japan Atomic Power, Co.)

果が出ている。

- (4) 天然資源の採掘、運河の掘さくなど具体的な目標をかかげた実験計画が次々とアメリカで発表され、具体化の方向に動いている。

このような事情から、最近はなほだしく注目を浴びるようになった核爆発平和利用について、以下順を追ってそのごく概略を説明してみたい。

Ⅱ. 核拡散防止条約との関連

核拡散防止条約は1968年6月に国連総会の決議で採択され、アメリカ、ソビエト、イギリスの核保有国を含めた多数の国が正式に調印するに至っている。国連総会に先立ってジュネーブの18ヵ国軍縮委員会で詳細な検討が行われたが、政治的な問題は別としても、技術上の問題に関しても実に多くの論議が行われた。

その中の1つが国際査察とそれに関連する商業機密の問題であるが、これについては本稿では立ち入らないことにする。核防条約が禁止しているのは、核兵器および核爆発装置について、非核保有国がこれらを製造し、保有し、または管理する(control)ことである。

直ちに問題になったのは2点あって、第1には核兵器または核爆発装置を平和の目的に使う場合はどうなるのかという点であり、第2には一体核爆発装置とは核兵器とどう違うのかという点である。

2番目の問題からとり上げてみよう。条約の範囲内で核爆発装置を定義しようとする試みはいろいろと行われた。わが国と西ドイツの間で非公式な専門家会議が行われた時も、この問題がとり上げられ、日本側から次のような試案が出された。

「核爆発装置とは、核分裂または核融合反応を用いて極めて多量のエネルギーを極めて短時間に放出し、かつ衝撃波を伴うようなものをいう」

いろいろな議論が行われた結果、どのような定義を用いても、厳密な形で核爆発を定義し、しかもそれが兵器として用いられる危険を十分に規定した上で平和利用の可能性は除外した形に持つてゆくことは不可能であるという結論に達した。言葉を変えていうと、現在わかっている技術の範囲内では、核爆発の平和利用とは取りも直さず、核兵器の平和利用と同義語である。核兵器と関係のない核爆発も考えられないわけではないが、そのような可能性を包括的な形で定義して、しかもこれを核兵器と区別するのは極めて困難である。

それでは核兵器を保有せず、製造しない国はその平和利用の技術まで放棄しなければならないのかという

のが第1の問題であった。この場合は、核兵器そのものを使うこと、つまり AEC のブラウシェア計画のようなものが問題になっているのであって、いわゆる技術の波及効果とは異っている。これについて成立した妥協が、核防条約第5条であり、この中には大略次のようなことが規定されている。

- (a) 核爆発の平和的应用から生ずる潜在的利益は、条約当事者である非核保有国に対し、適当な国際的監視の下に、適当な国際的手続きを通じて無差別の原則に基づいて提供される。
- (b) 使用される爆発装置について非保有国が負担すべき費用はできる限り低額であり、かつ研究開発の経費は含まれない。
- (c) 条約当事者たる非保有国は、条約発効後直ちにこのような目的で国際的な取決めに入ることができる。

すなわち、核兵器平和利用の技術を開発する権利は明らかに核保有国のものであるが、それによって生ずる恩恵は適当な国際的手続きを通じて非保有国にも使わせようというのである。ただし、その際にも核爆発装置自身は核保有国側が管理するのであるし、またここにいう「潜在的利益」とは技術の結果であって、技術の内容そのものを公開することを必ずしも意味していない。

しかし、このように核爆発平和利用が国際政治の舞台で広く論議の対象としてとり上げられるようになり、わが国でも「平和目的に限った核爆発の権利を留保する」という外務省発言などが飛び出してみると、一体その技術の内容と将来性はどんなものかということが改めて興味の対象となってくるわけである。

第2表 核兵器の大きさ

爆発力 (kt) [†]	直径 (in.)
10	12
100	18
1,000	24
10,000	36

[†] kt: TNT キロトン

特徴の第1は非常に大きなエネルギーを極めてコンパクトな容器から、極めて短い時間内に放出できるという点にある。TNT 火薬なら何万 t. に相当するエネルギーを、直径 30cm の容器に収められるということは、地中何100mないし何kmという深さまでエネルギーを送り込むにははなはだ便利である。現在のところ核爆発の平和利用は核兵器の地下爆発に限られてい

るが、1つにはこのような特徴を利用したものといえるであろう。

第1図は AEC がコスト計算のためにという注釈をつけて発表している数字であるが、これに基づいて異なったエネルギー源のコスト比較をしたものが次の第3表になっている。

第1図 核兵器の価格 (U. S. AEC)

第3表 100万 Btu 当りコスト比較

	ドル
2 Mt 核兵器	0.075
リグナイト	0.15~0.17
石炭	0.15~0.20
天然ガス	0.15~0.20
水力	0.89
ガソリン	1.50
電力(kWh 6 ミル)	1.78
硝酸アンモニア	4.50
10kt 核兵器	8.75
TNT 火薬	125.00

ただし、 $\text{TNT } 1 \text{ kt} = 4.0 \times 10^9 \text{ Btu} = 10^{12} \text{ cal}$
 $= 1.15 \times 10^6 \text{ kWh} = 1.45 \times 10^{23} \text{ 核分裂}$

この表からわかることは、大型核兵器を使用すると、エネルギーの使用形態ははなはだしく制約されるものの、そのコストはひどく安いことがわかる。したがって、低エネルギー・コストと形状のコンパクトさに加えて、使用可能なエネルギーの量が非常にほう大であることを考えると、もし核爆発を有効に利用する手段が可能であるならば、人類に対して全く新しい道具を提供することができるであろう。

直ちに考えつくのが土木工事である。第2パナマ運河の掘さくに核爆発を利用することは随分以前から考えられているし、天然資源の回収ということも問題になっている。その際にまず考えなければならない問題は

- (1) 放射能の与える影響、放射能ごとに地中に多量に含まれる炭化水素のHがトリチウムのように半減期の長いアイソトープで置き換えられた際の問題
  - (2) 地下核爆発の機構
  - (3) 地上の生活に与える爆発の影響
- などであろう。

Ⅲ. 地下核爆発の機構

爆発からの数 μsec の間に爆心を中心とする球状の洞ができ、高温高压のガスが充満して、この空洞を押し広げ、球の内外圧が平衡するまで続く。空洞の冷却が始まるとガスは液化し、熔融した岩が底部に溜まり始める。ついで衝撃でひびわれした岩が空洞の天井から重力で落下する現象に移り、その結果として一番右端のような「チムニー」が形成される。チムニーの形状と、それに至る過程は爆発力の大きさと共に、周辺の地層と岩の状態によって異なることはいうまでもない。

第2図 地下核爆発の概念図

第4表に過去の地下爆発によって形成されたチムニーの大きさに関するデータをみることができる。爆発力が同じくらいでも、地層その他の条件によって結果にはかなりバラツキのあることがわかる。

地下天然資源の回収は主としてこのチムニーを利用している。簡単にいうと、低品位であって通常の手段では経済的採掘が不可能であるような資源を含んだ地層の中心部までドリルをして、核爆弾を挿入、その岩

第4表 チムニー形成のデータ

地 層	爆 発 力 (kt)	爆心地深さ (m)	上部岩密度 (g/sec)	チムニー半径 (m)	チムニー高さ (m)
凝 灰 岩	1.8 ±0.2	274	1.9	19.8	117.7
〃	5.4 $\begin{smallmatrix} +0.2 \\ -0.4 \end{smallmatrix}$	283.5	1.8	28	134.1
〃	22.0 ±2.0	301.1	1.8	44.2	301.1
〃	2.7 ±2.3	402	1.9	19.8	90.5
〃	2.0 ±0.2	191.4	2.2	21.6	81.6
沖 積 層	0.47±0.05	181.1	1.9	11.3	—
〃	2.8 ±0.3	181.1	1.9	24.7	181.1
〃	8.3 ±1.0	256.3	2.0	27.7	256.3
凝灰岩/沖積層	12.0 ±1.5	304.8	2.0	32.6	304.8
〃	3.4 ±0.3	187.1	1.9	25.9	187.1
花 崗 岩	5.0 ±1.0	286.2	2.7	19.2	85.6
〃	13.4 ±2.0	367.4	2.7	25.6	108.5
白 雲 石	12.0 ±1.0	402.3	2.3	21.3	68.0
岩 塩	3.4 ±0.5	360.9	2.3	18.7	—
〃	5.3 ±0.5	827.8	2.3	16.7	—

(1) 爆発力は測定による。

(2) 1967年9月ニューメキシコで開かれたガスバギーセミナーにおける AEC 情報より。

を砕いてチムニーを形成させる。天然ガスの場合にはチムニーがガスで充満されるので、これを地上にパイプで取り出すようにする。頁岩中の石油であれば、チムニー内の砕けた頁岩に地上から酸素を適当に供給して徐々に 750°F ぐらいで酸化させ、炭化水素を液化してチムニーの底に貯めて汲み出すようにする。低品位

銅の場合には上からリーチング・ソリューションを流して、チムニーの下部からこれを汲み出すことが考えられている。

これらの各資源の回収についてどのような実験が計画されているかは後で述べることにして、以下第3～5図に、それぞれについての概念図を示す。

第3図 天然ガスの回収(1967年ガスバギー計画の場合)

第4図 頁岩よりの石油の回収

第5図 低品位銅の回収

いままで述べたのは爆発が地中深く起きた場合であるが、爆心地が比較的地表に近い時には様相が多少異なっている。第6図はその場合の概念図であるが、このような現象を利用して、運河などの土木工事を行うことが考えられている。

第6図 地表に近いところで起きた核爆発

第7図は新パナマ運河について現在進められている概念計画と候補地点を示している。

第7図 核爆発による新パナマ運河計画

Ⅳ. 実験計画と問題点

1958年末にアメリカが自主的に核実験の停止を宣言するまでに、同国が空中、地上、地下で行なった兵器実験は150以上にのぼるといわれる。地下爆発のデータがこれらの経験から多く集められたことは明らかであろう。それ以後ブラウシェアに多少とも関連して行われた AEC の実験は第5表に示すとおりである。

地下爆発の平和利用は特に1967年から活発に実験計画が進められるようになった。

第5表 アメリカの地下核実験

1957	Rainier (1.7 kt., 最初の大規模地下実験 889 ft.)
1958	Rogan (5 kt.), Blanca (19.2 kt.)
1961	Gnome (3.1 kt., Plowshare 計画として最初の実験)
1962	Hardhat (5 kt.) Sedan (100 kt. 開孔実験 120 ft. 深さ 320 ft. の鉢型の穴) Danny Boy (400 t. 開孔実験) Anacostia (ヘビーアトム製造)
1963	Anchovy, Kenebec (同前)
1964	Par (30 kt.), Barbel, Dub Clickitat, Ace (きれいな水爆を使った実験) Dugout (火薬によるシミュレーション) Sulky, Handcar (11 kt.)
1965	Palanquin (4 kt.), Preschooner (火薬)
1966	Pre-Gondola, Vulcan, Duryea, Kankakee, Cyclamen
1967	Switch, Marvel, Gasbuggy
1968	Cabriolet (2.5 kt.) 1 連のパナマ運河予備実験の初まり

(ANS: Nuclear News, March, Vol. I, No. 3, 1968 による)

1. Gasbuggy

アメリカではロッキー山系のうちワイオミング、コロラド、ニューメキシコの3州の地下に多量の天然ガスが含まれ、特に浸透度の悪い岩の中にしっかりと貯えられて地中に空隙まで達していないものが沢山ある。これらを回収することができれば、アメリカの天然ガス産出を一気に倍増することが可能だというのが1連の計画のねらいである。

ガスバギーはその最初のものとして1967年11月にニューメキシコ州で実施され、筆者も爆発前の現地セミナーに参加して、石油、ガス関係者がいかにこの回収手段に大きな期待を抱いているかに驚いたものである。

この計画はエル・パソ天然ガス会社が AEC, アメリカ鉱山局と共同で進めたもので、直径 24 in. の穴を 4,240 ft. まで掘り、軟鋼の熔接したシャフトを沈めて、26 kt. の核兵器を装荷し、常温、常圧に保つように

してからシャフトをコンクリートで埋めておいて爆発を起させたものである。爆発地点の周辺には3本の監視孔を設けて地層に対する爆発の状況、温度、圧力の変化、地下水の様相などの測定を行なった。

実験の目的は、①爆発による地層の影響が理論計算とどの程度一致するか検証、②爆発時の放射能の地表への漏洩(これは予測どおりゼロであったことがエアボーン・アクティビティの測定結果として報告されている)、③爆発時の地震波の伝播の状況、④チムニーに貯まった放射能の測定、の4つであった。

①と③については何の報告も明らかにされていないが、④の放射能については、AECは最近次のような主旨の発表を行なっている。爆発自体によるF.P.の形成はわずかであり、かつ熔融した岩の中にほとんどトラップされてしまうものと考えられていた。一番問題となるのはトリチウムで、特に天然ガス中のハイドロカーボンがトリチウムと置換されると、最大値としては許容量をはなはだしく上回ることになる可能性があり、こうなると核爆発によって回収された天然ガスは少なくとも一般家庭用として使えないことは明らかである。ガスバギー計画の経済計算では、通常の採掘方法と比べて単価がやと等しくなる程度であるから、これでは将来性ははなはだおぼつかないことになる。

AECの発表では、第1回のガス・サンプル中のトリチウムは約100 $\mu\text{Ci}/\text{ft}^3$ 、もっと日が経ったものは16 μCi で予想をはるかに下回る数値であった(トリチウムの許容度は空気中で $2 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cc}$ 、水中で $3 \times 10^{-2} \mu\text{Ci}/\text{cc}$ である)。 ^{85}Kr は約3 μCi 、 ^{131}I は発見されず、 ^{88}Xe はトレース程度であった。これらのガス・サンプルはチムニー頂部から採取されたので必ずしも代表的なものとはいえず、AECとしては第2の掘さくを行なってさらに放射能分析を進める予定としている。なお爆発による回収の場合は、いずれにしても最初にチムニーに貯まるガスはページして、アクティビティ・レベルが低下してから、チムニーに貯まってくるガスを利用することになっている。なお、ガス分析の結果によると、爆発前掘さく孔内のガスは99%メタン等であったのに対し、爆発後のガスは43%ハイドロカーボン、36%炭酸ガス、17%水素、4%一酸化炭素であった。これは周辺の岩に含まれた炭化物が CO_2 になったことを示すものと解されている。

2. その他の天然ガス計画

Gasbuggyの一応の成功にはげまされて、Gasbuggy-IおよびII計画がとり上げられている。これは少量

の核爆発を150 ft.の間隔で、150 ft.の深さで5つ同時に起させて、地下にトンネルを作ろうとする試みである。Rulison計画はオーストラル石油会社がAECに提案しているもので、コロラド州で実験の予定であり、50 kt.の爆弾を数100 ft.上下に離れた地点で同時に爆発させて、背の高いチムニーを作り出すことを目的としている。一応1968年末を予定時期としている。Dragon Trailはコンチネンタル・オイル会社がAECと話し合っているもので、同じくコロラド州で1968年中に40 kt.の核爆発を起させることを予定している。Project Ketchは性質の異った計画でAECとコロンビア・ガス・システム社が正式な検討を行なっているが、ペンシルバニア州の比較的人口稠密地域の地下に核爆発によって天然ガスの貯蔵施設を作ろうとするものであり、天然ガスの液状貯蔵が1,000 ft^3 当り6~12ドル費用がかかるのに対して、核爆発の利用は2~4ドルで済むので有利であると考えられている。

オイルシェール コロラド、ユタ、ワイオミング3州には3,200億バレルの油が頁岩に含有されているとされ、これの回収のための実験としてBronco計画が考えられている。これはオイルシェール関連各社がAECに提案しているもので、3,000 ft.の深さで100 kt.の核爆発を起させようとするものである。

低品位銅 ケネコット銅会社とAEC、内務省が共同でProject Sloopを計画している。アリゾナ州で地下1,250 ft.のところに20~30 kt.の爆発を行う予定である。

その他 カナダの一部のように、石油が砂岩層中にターールとしてtightに含有されている場合にはGasbuggyと似たような形でこれを回収することが可能と考えられている。また、核爆発のエネルギーを利用して地熱発電をすること、建築材などに必要な岩石の砕掘を行うこと、流水の下の方層を破碎して地下水の流れを作ることなどが考えられており、ことに後者についてはアリゾナ州知事の要請により、AECと内務省が1968年から正式に検討を開始している。

パナマ運河 1957年にアイゼンハワー大統領が新パナマ運河計画を公表し、1958年にはプラウシェア計画がこれに参加することになった。1964年にはジョンソン大統領が関連各国と調査協定を結んで積極的に推進する旨を声明している。AECの調査によると、現在の運河近くに新しい掘さくを行うためには核爆発は適当ではないが、その他の地点では核爆発を利用することが最も経済的である。核爆発の利用には部分核実験停止条約からの問題がないわけではないが、議会の

原子力合同委員会はこの方法を強く推奨している。

第7図のB案については、全長48mile, 深さ1,100ft.の運河が考えられ、10 Mt. を最高に、計 170 Mt. の使用が考えられている。総経費の予想は6億5,000万ドル、うち現地調査と設計に3,000万ドル、核爆発工事が2億2,000万ドルと予想されている。C案については現在まだ調査と検討が進行中である。いずれにしても、1965年 AEC のシーボルク委員長の説明では、運河工事を実際に始めるまでには Cabriolet のような予備実験等をなお5年間ぐらい続ける必要があるとされている。

運河工事を行うに当たっての安全上の問題は、地震や衝撃波の伝播のほか、何といても放射性物質の拡

散である。この点については核爆発装置自体の改良、(きれいな水爆の技術が進んだこと)および爆発の強さと爆心の深さとの関連を上手に選択することによって(空中に吹上げられて散る土壌の量がコントロールできるので)放射性物質の拡散を抑えることが、今後ますます可能になると考えられている。第8図にその間の事情を示している。一番左端は1962年に100 kt. の核爆発を行なった Sedan 実験の結果であって、それぞれの距離の地点に戸外で生活する人が一生の間に受けるであろう γ -dose を示す。1965年の技術では、これがほぼ中央の(b)程度まで下り、さらに将来は(c)まで低下するものと考えられている(Sedan 実験時の気象条件等の詳細はわかっていない)。

第8図 核爆発による放射性物質の拡散

核爆発の平和利用の諸種の可能性については以上述べて来たとおりであるが、特に放射能の問題を中心として未解決の事項は多い。わが国のような条件下でこの技術が実施に移されるには幾多の問題があるが、広大な土地と天然資源を有する国にとってははなはだ興味ある技術であるように思われる。1967年のニューメキシコのセミナーでも、南アメリカ、オーストラリアなどの人々が特に興味を示していた。またアメリカとフランスでは地下核爆発の平和利用を専門とする民間会社も発足している。核爆発による超ウラン元素の製造という問題もあるが、まだ一般的興味とはなっていないようである。なお、核爆発に関する文献は LRL のものが多いが、「TID-3522 (8th Rev). Bibliography of the Civil, Industrial and Scientific Uses of Nuclear Explosives, compiled by C. R. Gerber & H. E. Voress」によく網羅されている。

「原子炉物理実験」(再版)

会員特価頒布

本会臨界実験専門委員会成果報告書『原子炉物理実験』(A5判 244頁, コロナ社発行)は、39年1月発行以来大学、研究所、会社等でテキストとしても利用され、好評です。再版に当り一部増補しましたので、ご希望の方は事務局へ。会員特価 800円(定価 1,100円, 千90円)

第1章 臨界近接

第2章 制御棒の校正

第3章 反応度係数の測定

第4章 動特性に関する炉物理定数の測定

第5章 出力の校正

第6章 中性子束分布の測定

第7章 中性子スペクトルの積分測定

第8章 熱中性子利用率と共鳴吸収の測定

第9章 指数実験

第10章 パルス法実験

第11章 Rossi- α 法による中性子寿命と実効増倍係数の測定

付 録 装置要目表