解	説
---	---

気 泡 検 出 器

—開発の歴史, 原理, 特性とその応用—

小 泉 勝 三^{*1}

(1991年12月18日受理)

Bubble Detector—History of Development, Principle, Characteristics and Its Applications

Katsuzo KOIZUMI^{*1}

KEY WORDS: neutron dosimetry, bubble detector, superheated, Freon-12, polyacrylamide, temperature dependence, personal monitoring

1. はじめに

中性子を検出する方法として, 過熱液体の沸騰現象を利用した“Superheated Drop Detector”または, “Bubble-Damage Polymer Detector”と呼ばれる検出器が開発され注目されるようになってきた。この検出器は, 泡箱とその原理を同じくするものであるが, 中性子を気泡という, 目で見える形でとらえることができる点できわめてユニークな計測方法である。

本解説では, 泡箱にさかのぼって過熱液体の泡生成の原理を説明し, この原理を利用した APFEL と ING の考案した気泡検出器の特徴, 基本特性, および筆者が試作した気泡検出器の特性ならびに気泡検出器の応用例などについて紹介する。

2. 気泡検出器開発の歴史

2.1 泡箱について

1952年に GLASER は放射線を検出する方法として最初に Superheated liquid を利用した Bubble Chamber (泡箱) について発表している。彼の論文によれば, 霧

箱のもつ長所と, 原子核乳剤のもつ長所を兼ね備えた検出方法として, 短時間で繰り返し使用ができ, 霧箱より小型で, 原子核乳剤と同等の測定精度をもつものを目指していたことがうかがえる¹⁾。

過熱状態 (superheated) とは, Fig. 1 に示すように, 温度 T_0 と圧力 P_0 で液体である物質について, 温度を徐々に T_0 から T_1 の状態にした時, 温度が相変化のラインを超えて, 本来は気体になる温度 T_1 になっても, 元の液体状態で存在し, また, 圧力を徐々に P_0 から P_1 の状態にした時, 本来は気体になる圧力 P_1 になっても元の液体で存在する状態, すなわち, 本来相変化が起こる温度あるいは圧力になっても元の相 (液体状態) を保っている状態をいう。これは, 一種の準安定状態である。

GLASER の考案した Superheated の状態は, Fig. 2 に示すように,

① 右側のエチルアルコールを満たしガラス容器 (一部はエチルアルコールの蒸気層を残しておく) の温度をホットバスの中で 140°C に保ち, 左側のエチルアルコールを満たしたガラス容器をホットバスの中で 160°C に上昇させる。両方のガラス容器は連結管にて接続しておく。この状態で左側の圧力が高いので, 右側のガラス容器はエチルアルコールで満たされる状態になる。ガラ

^{*1} 動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター安全管理部; 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 (〒311-13) Health and Safety Division, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation; 4002 Narita-machi O-arai-cho, Higashi-ibaraki-gun, Ibaraki 311-13.

Fig. 1 Phase diagram of a substance in solid, liquid and vapor phase.

Fig. 2 First experiment demonstrated that particles can trigger boiling in a superheated liquid. 160°C bath was removed, the pressure in the sealed tubes fell from 21 atmospheres to one atmosphere and liquid ether in the 140°C bath at right become superheated. The ether boiled when it was exposed to radioactive cobalt.¹⁾

ス容器内は大気圧よりも圧力が高いので沸騰しない。

② つぎに、左側のホットバスを取り去ることにより、エチルアルコール蒸気は冷やされ、圧力は下がる。この状態で、右側の温度を 140°C に保ち続けると、エチルアルコールは液体の状態が存在して、数分間過熱状態

が維持される。

③ この状態において、電離放射線を照射すると、気化（沸騰）が起こる。

このようにして、過熱状態を作ることができ、放射線が気化の引金になることが確認された。

彼は、この加圧、減圧の方法をピストンに変え、高速度映写機を用いて気化の瞬間を撮影し、霧箱と同様の中間子の飛跡の撮影を行っている。また、過熱状態から気化が起こるとき“plink”音が出ることを見だし、この音を撮影フラッシュの同期に使う方法を試みている。

2.2 気泡検出器について

(1) APFEL タイプの気泡検出器

1979 年に、APFEL は、GLASER の泡箱にヒントを得て、これを発展させ、グリセリンのような粘性をもった物質中に、chloro-fluoro carbon-12 (CCl_2F_2 -12) (以下「フレオン 12」という) のように沸点が室温より低い物質を過熱状態で混合し、これを用いて、中性子によって数個の気泡が生成する検出器を考案し、この検出器が個人被曝モニタリングや作業環境モニタリングに利用できることを発表している^{2,3)}。APFEL はこの検出器を“Superheated drop detector”と呼んでいる。

APFEL は、このような過熱状態にある液体を沸騰させる引金として、

- ① 微視的な気泡、ガスポケット、固体不純物など異種の核形成の存在
- ② 放射線の相互作用
- ③ 分子レベルでの大きな密度の揺らぎによる核形成などがあるとしている。このほかに、超音波、機械的刺激、マイクロ波なども沸騰の引き金になる。

APFEL は、過熱状態を作り出す手段として、圧力をかけた容器に入った液体状態のフレオン 12 を抜き取り、これを、圧力をかけた容器中でグリセリンなどの粘性をもった物質と混合したのち、圧力を大気圧に戻す方法について述べている。この方法で、グリセリン中に均一に分散した直径約 1 mm のフレオン 12 の液滴を作ることができるとしている。

常温で過熱状態となる化合物として、フレオン 12 の他、フレオン 114 ($\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_4$)、*cis*-2-butane (C_4H_8)、1-butane (C_4H_{10})、*n*-butane (C_4H_{10})、2,2-dimethyl propane (C_5H_{12}) などがある。

この APFEL タイプの検出器は、生成した気泡が時間の経過とともに容器の上部に上昇し、溜った気体の体積を計測することにより、照射された中性子の線量を知る方法である。この方法では計測の精度が必ずしも十分でないため、彼は、気泡が生成するときの音に着目し、こ

の音を圧電素子で検出し、カウンターにて音の数を計数する方法を考案している⁴⁾。中性子に対する感度は、過熱液体の添加量によって変化するが $10 \mu\text{Sv}$ 当り 5~20 個の気泡が生成する。

(2) ING タイプの気泡検出器

カナダのチョークリバー国立研究所の ING は、1984 年に過熱状態の液滴を柔らかい高分子化合物の中に閉じ込める方法を考案し、プラスチック容器に入った約 5 cc の透明な高分子化合物中の気泡の数を数えて、中性子線量を知る検出器を開発している^{5,6)}。

ING はこの検出器を “Bubble-damage polymer detector” と呼んでいる。

過熱状態の液滴にはフレオン 12, またはフレオン 114 を用い、この過熱液体を冷却する方法により高分子化合物に混合する方法を考案している。過熱液滴の直径は約 $25 \mu\text{m}$ である。高分子化合物には polyacrylamide を用いている。この検出器は、 $10 \mu\text{Sv}$ の中性子に対して、過熱液体の添加量によってその感度は変化するが 3 個から 30 個の気泡が生成する。

韓国の KANG ら⁷⁾は、Ing と同様に polyacrylamide とフレオン 12 を用いて気泡検出器を作り、 $10 \mu\text{Sv}$ の中性子に対して、3 個から 7 個の気泡が生成することを報告している。

気泡検出器は、その原理から、もともと温度変化に対して敏感で、温度の上昇につれて感度は高くなる傾向を示す。この温度依存性を補償する方法として ING は容器の上部に液体のフレオン 12 を入れておくことによって、温度が上昇するとフレオン 12 が気化し、内部の圧力が高くなり、この圧力の上昇によって、感度を抑え、その結果として感度の平坦化ができるとしている。最近ではフレオン 12 の代わりに、温度上昇によって膨張する物質を、容器の上部に詰める方法が考案されている。ING らは、この気泡検出器を再生利用する方法として、照射後の気泡が生成したアクリルアミドに水圧を加え、気泡をもとのフレオン 12 液滴にもどすことを試み、最近では、これを発展させて、アクリルアミドの上部にグリースを詰めネジで締め付けることにより圧力をかけて再生する方法を考案し、実用的価値を高めることに成功している。

3. 泡発生の原理

液体の沸騰現象を理論的に取り扱ったものとして GIBBS の論文がある。この GIBBS の理論は、イエ・イ・ネシスが “液体の沸騰”⁸⁾の中で解説している。GIBBS の理論によると、液体が比較的安定か、もしくは準安定な過熱状態で存在できるのは、安定蒸気状態への移行に若干

の活性化障壁の克服が必要なためであるとし、この障壁の存在は、表面力の作用と関係づけられるとしている。

すなわち、過熱状態にある液体内に泡が生じる場合、熱力学ポテンシャルは、一方で、分子がより安定な状態に移行すること（体積効果）によって減少し、他方では表面エネルギーの出現（表面効果）によって増大する。系の熱力学的ポテンシャルは、泡のある一定の《臨界》寸法で最大値になる。したがって、泡は臨界寸法に達したときにだけ自発的成長が可能である。GIBBS は、この表面力を克服して臨界泡を作るのに必要な仕事量こそが過熱液体の準安定状態の尺度となると考え理論化を試みている。

以下に GIBBS の理論をもとに、臨界核の役割を演じるために泡の寸法と、その中の圧力がどのような値でなければならないかを示す。

あるとき発生した泡が液体内で若干時間存在しうるためには、普通相平衡条件—すなわち、泡の内外部の圧力と温度および化学ポテンシャルの均合い—が成立しなければならない。温度についての平衡は、臨界泡の寸法が機械的および分子・力学的平衡で決まるため、常に成り立つと考えられる。

したがって、泡内の蒸気圧が外気とラプラス圧力の和に等しいとの条件から

$$P = P_0 + \frac{2\sigma}{R} \quad (1)$$

ここに P : 泡内の圧力 (atm)

P_0 : 外気圧力 (atm)

σ : 表面張力 (dyn/cm)

R : 臨界泡の半径 (cm)

を得る。

また、 $\frac{4\pi R^3}{3}$ の体積をもつ核の発生仕事は、おそらく泡を含む系とそれをもたない系の熱力学ポテンシャルの差に、相界面の表面エネルギーを加えた値に等しいと考えられる。したがって

$$\begin{aligned} W &= \Phi - \Phi_0 + \sigma S \text{ (keV)} \\ &= -(P - P_0) \frac{4\pi}{3} R^3 + 4\pi R^2 \sigma \end{aligned}$$

これに、(1)式に基づいて、圧力差 $(P - P_0)$ を代入すれば、核の生成仕事の式が得られる。

$$W = \frac{4}{3} \pi R^2 \sigma \text{ (keV)}$$

この仕事は、圧力勾配 $(P - P_0)$ の関数であらわす方が便利な場合もある。このため、最終式内の R を $2\sigma / (P - P_0)$ に置き換えて、次の等価式を得る。

Table 1 Certain observed and other physical parameters for Freon-114 ($\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_4$) at two different temperatures.³⁾

Items	Temperature	
	26.5°C	41.3°C
1. Observed threshold neutron energy	4.1 MeV	0.46 MeV
2. Maximum energy imparted to:		
carbon	1.16 MeV	0.13 MeV
fluorine	0.78 MeV	0.087 MeV
chlorine	0.45 MeV	0.05 MeV
3. Surface tension (dyn/cm)	11.85	10.38
4. ΔP (atm) ; 1 atm = 10^5 Pa	1.28	2.60
5. Critical radius ($\times 10^{-6}$ cm)	18.51	7.98
6. (dE/dx) in MeV cm ² /mg corresponding to ion in item 2 that deposits the maximum energy	3.75 (carbon)	1.56 (chlorine)
7. Energy E_c , deposited in critical diameter in keV	204 ^{a)}	50 ^{b)}
8. Gibbs energy, W in keV	10.64	1.73
9. $\eta = W/E_c$	0.052	0.035
(Inhibition temperature $\sim 13^\circ\text{C}$ based on a chlorine ion projectile)		

^{a)} $E_c = (dE/dx) \times 2R_c$.

^{b)} This is the entire chlorine ion energy because the range of this ion is less than $2R_c$.

$$W = \frac{16\pi\sigma^3}{3(P-P_0)^2} \quad (\text{keV}) \quad (2)$$

ROY と APFEL ら³⁾は、気泡検出器について、実験的に、ある温度において気泡を生成するのに必要な中性子の最小エネルギーと、しきい圧力差 $(P-P_0)$ を求め、(2) の理論式を基に、気泡が生成するのに必要な最小のエネルギーを計算している。

彼らの計算結果を **Table 1** に示す。

この結果から、ROY ら³⁾は、気泡生成に必要な最小エネルギーは、温度 26.5°C のとき 10.6 keV であり、これは 4.1 MeV の中性子によって生じる 1.16 MeV の C (炭素) の反滴核が液滴を通過するパスの中で失うエネルギーの約 6% に相当するとしている。

この他、泡箱の理論を説明したものとして SEITZ の論文がある⁹⁾。彼は、(2) 式を蒸発熱を用いて次の式を導いている。

$$W = \frac{16\pi\sigma^3}{(P-P_0)^2} \left(1 + \frac{2H_S}{3Z_e R_g T} \right) \quad (\text{keV}) \quad (3)$$

ここに

H_S : mol 当りの蒸発熱

Z_e : 圧縮性係数

R_g : 気体定数

Fig. 3 Process of bubble formation.

T : 温度

この式から、温度 T が大きいほど、また、圧力差 $(P-P_0)$ が大きいほど、さらに表面張力 σ は小さいほど仕事量 W は小さくなることがわかる。

また SEITZ は、泡生成のしきいエネルギーの計算値が

ら、泡の生成は、放射線と物質の相互作用によって生ずる δ 線が液体水素や、液体プロパンなどの場合の泡生成に寄与しており、液体水素や液体プロパンの電子系に転移されたエネルギーの大部分が熱となり、この熱が微小な泡の核を生成することによって液体が気化すると説明している。

粘性物質中に過熱液体（フロン 12）を分散させた気泡検出器について、中性子を照射したとき気泡が生成する過程を図で示すと **Fig. 3** のようになる。まず、中性子が過熱液体物質（フロン 12）の構成元素である C, Cl, F に弾性散乱によってそのエネルギーを与える。エネルギーを付与された C, Cl, F がフロン 12 の中を進む過程においてそのエネルギーの一部（SEITZ の説明によれば、この時生成される δ 線のエネルギー）が過熱液体に熱エネルギーを与え、その結果、微小な泡の核が形成される。この泡の核が臨界径よりも大きい場合、過熱液体は、その全体が気化し気泡になるものと考えられる。

4. 気泡検出器の特性

4.1 温度依存性

気泡検出器は、過熱液体の沸騰現象をその原理に利用していることから、温度変化に敏感である。その温度依存性は、使用している過熱液体物質の種類によって決まる。SISK ら¹⁰⁾は APFEL タイプ（過熱液体はフロン 12）の検出器について、22°C から 10°C の間で 1°C 当り感度は 6% から 7% 低下し、22°C から 32°C の間で 1°C 当り 4% から 5% 増加すると報告している。

小泉ら¹¹⁾は、ING タイプの気泡検出器を試作し 16°C から 33°C の温度範囲において **Fig. 4** に示す感度の温度依存性を得ている。これによると、この温度範囲において、1°C 当たり感度は 5% 増加し、SISK らと同等の結果となっている。

この温度依存性を補償する方法として

- (1) 使用条件の温度を記録しておき、校正した温度との差による感度差を、温度特性曲線を用いて補正する。
- (2) 検出器を容器に入れ、校正した時と同じ一定温度に保つ。
- (3) 検出器に過剰の過熱液体を加えるか、または、検出器上部に温度が上昇したとき熱膨張する物質を詰めておくことによって、温度が上昇したとき、内圧が上がる（温度が下がったとき内圧が下がる）ことを利用するによって自動的に補償する（ING の考案）などが考えられている。

いずれにしても、気泡検出器の使用にあたっては、そ

Fig. 4 Change in sensitivity with temperature of a detector using Freon-12 as a detector liquid.¹¹⁾

Fig. 5 Energy response of Freon-12 versus ICRP dose equivalent curve.¹²⁾

の温度特性を把握した上で、温度に対する感度補正をすることが必要である。

4.2 中性子エネルギー依存性

気泡検出器の特徴として、中性子エネルギーが 100 keV から数十 MeV の領域に高い感度をもっていることが挙げられる。APFEL タイプと ING タイプの中性子エネルギーと感度の関係を **Fig. 5** と **Fig. 6** にそれぞれ示す^{12,13)}。

APFEL は気泡検出器が、熱中性子場（Cd 比が 10^4 の場）において感度を示すことから、熱中性子に対しては $^{35}\text{Cl} + n \rightarrow ^{36}\text{S} + p$ (0.6151 MeV) (反応断面積 0.4 barn) または、

$^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + p$ (0.6246 MeV) (反応断面積 1.75 barn) の反応が起こっていることを示唆している¹⁴⁾。

PERKS ら¹⁵⁾は、2.7 keV の中性子に対し $^{19}\text{F}(n, \gamma)^{20}\text{F}$

Fig. 6 Dose equivalent response of a bubble detector having $\Delta P=5$ atm.¹³⁾

反応が寄与していることを報告している。

気泡検出器の中性子エネルギー特性は、従来用いられてきたアルベド型 TLD が、100 keV から数十 MeV の範囲でエネルギーの増加とともに感度が急激に低下するのに比べ、このエネルギー領域での感度の変化曲線が ICRP の線量当量曲線に類似した傾向をもつという優れた特長をもっている。

ING は過熱液体の種類を変えることによって、中性子に反応するしきいエネルギーを変え、6 種類のしきいエネルギーの異なる検出器を用いることにより、おおまかな中性子エネルギーが測定できる方法を報告している¹⁶⁾。

気泡検出器の気泡数から中性子線量当量に換算するに当たっては、実際の作業場所においてレムカウンターを用いて測定した線量当量と気泡の数の関係から求めた換算定数を用いるか、単一エネルギーの中性子を用いて求めた中性子エネルギー依存性のデータと、作業場所の中性子エネルギースペクトルの情報から求めた線量当量を用いて換算係数を決めることが必要である。

現在、市販されている気泡検出器は $^{241}\text{Am-Be}$ の中性子による感度定数が表示されており、とくに作業場所の中性子エネルギーが 100 keV より低い場合には感度が桁のオーダーで低下するので、 $^{241}\text{Am-Be}$ の感度定数を一律に用いた場合には、著しく過少評価することになる可能性があるため注意が必要である。

4.3 γ 線に対する感度

過熱液体にフロン 12 を用いた場合 APFEL によれば、6 MeV 以下の X 線または γ 線にたいして感度はなく、6 MeV 以上になると光核反応により重イオンが生成しこれにより気泡生成の可能性があると報告している²⁾。

ING は、過熱液体の種類を変えることによって、 γ 線に感度をもつ気泡検出器を開発しているが、その組成や、反応のメカニズムについては報告されていない。この γ 線用の気泡検出器は、10 μSv 当り 200 個から 2,000 個程度の非常に多くの気泡が生成し、感度は非常に高い。

4.4 線量直線性

照射した中性子と、生成する気泡の数の関係は、密閉構造の容器を用いた場合、ある範囲までは直線性があるが、気泡の生成とともに、容器内部の圧力が高くなり、このため、気泡を生成するのに必要なしきいエネルギーが高くなり、結果として感度は低くなっていく。気泡の数を肉眼で計数する場合には、計数しやすい数は有効体積 5 cc のもので 30~50 個程度である。このため、使用する線量領域において数十個の気泡数になるように最初に添加する過熱液体の量を調整し、過熱液体の添加量を変えることによって、1 μSv から 100 μSv 用、100 μSv から 10 mSv 用といったふうに使わせるのが実用的な使い方である。

小泉ら¹¹⁾ はフロン 12 を用いた ING タイプの気泡

Fig. 7 Response of bubble detector with dose equivalent delivered by ^{252}Cf neutrons.¹¹⁾

Photo. 1 Typical bubble detector after exposure of ^{252}Cf neutron.

検出器を試作し、この検出器が ^{252}Cf の中性子に対し、数 $10\ \mu\text{Sv}$ の線量低い線量域において感度を有し、その感度は Fig. 7 に示すように 24 気泡/ $10\ \mu\text{Sv}$ で、その線量直線性も良好であることを報告している。 ^{252}Cf の中性子を照射した気泡検出器を Photo. 1 に示す。

APFEL は、計数方法として、気泡が生成するときには発生する“Plink”音を利用して、piezoelectric transducer をセンサーに用いて、気泡の発生数を計数する可搬型の装置を報告している^{4,12)}。この結果を Fig. 8 に示す。この音を計数する方法を用いると約 20,000 個まで計数できるが、気泡の生成とともに感度は低下する傾向を示している。Fig. 8 から、気泡検出器の直線性が成立する範囲は、気泡の数が 500 個程度までである。

4.5 フレオン 12 液滴径と気泡径の関係

APFEL の気泡検出器の中性子照射によって生成する気泡の直径は、 $1\sim 3\ \text{mm}$ と報告されている²⁾。また、ING の気泡検出器の過熱液体の直径は、 $20\sim 25\ \mu\text{m}$ で、中性子照射によって生成する気泡の直径は、 $1\sim 3\ \text{mm}$ と報告されている⁵⁾。小泉ら¹¹⁾は、過熱液体にフレオン 12 を用いた場合、その泡滴径と気泡径の関係を実験的に求め Fig. 9 の結果を得ている。Fig. 9 から、フレオン 12 液滴の直径が $30\ \mu\text{m}$ から $130\ \mu\text{m}$ の場合、このフレオン 12 液滴の気化によって生じる気泡の直径は、 $180\ \mu\text{m}$ から $570\ \mu\text{m}$ の間にあることがわかる。すなわち、気泡の直径は、もとの、過熱液体の径に比例して大きくなることを示している。

4.6 繰返し使用の再現性

APFEL タイプのものは使い捨てであるのに対して、ING タイプのものは、再加圧により繰返し使用ができる構造になっている。LIU¹⁸⁾ らは、 $^{238}\text{Pu-Be}$ 中性子源を用いて照射と再加圧を繰返し行い、そのばらつきを試験している。試験は、26 週の間に 24 回の照射と、照射の 2 日後に再加圧する操作を繰返し行い、Fig. 10 に示す結果を得ている。気泡数の平均値 33 個に対し、標準偏差は約 20% であることを報告している。

この再加圧により再利用できることによって、気泡検出器の個人被曝線量計としての実用的価値は高まったといえる。気泡検出器は 6 カ月以上放置しておくとき感度が低下する傾向が見られる。これは過熱液体が徐々に抜け使用するためと思われ、長期間放置した気泡検出器を再度使用する際には、値付けされた中性子線源を用いて感度を再確認した後使用するなどの注意が必要である。

4.7 検出限界

気泡検出器の感度は、加える過熱液体の量に依存する。有効体積 $5\ \text{cc}$ のもので、 $10\ \mu\text{Sv}$ 当り気泡数 30 個程度のものを作ることができる。このときの繰返し照射による標準偏差は約 20% であり、この標準偏差の 3 倍を検出限界と定義すると、検出限界は $7\ \mu\text{Sv}$ となる。さらに有効体積を大きくすることによって感度を上げることもできる。これは従来、中性子用個人被曝線量計として用いられてきたアルベド型 TLD、固体飛跡検出器の検出限界 $200\ \mu\text{Sv}$ と比較して約 30 倍良い値で、この高い感度が気泡検出器の大きな特長である。

5. 気泡検出器の応用

気泡検出器は、放射線と物質の反応の跡を視覚で捉えることができるという点で、従来の放射線検出器にはない特徴をもっており、 γ/n 比の高い場所での中性子測定、低い線量域 ($10\ \mu\text{Sv}$ 程度) での中性子測定ができる

Fig. 8 Typical Sensitivity of SDD Compositions (4 ml Cartridge).¹⁷⁾

Fig. 9 Relationship between Freon-12 droplet diameter and bubble diameter.¹¹⁾

ことから個人中性子モニタリング、作業環境中性子モニタリングへの利用の他、狭い空間での中性子測定や、水中での中性子の減衰率の測定¹⁹⁾、宇宙船での中性子被曝測定¹⁶⁾、核融合での中性子測定など、広い分野での利用が考えられる。

中性子個人被曝線量計への利用例として、Liu ら¹⁸⁾

は、2種類のINGタイプの気泡検出器と、熱中性子用およびアルベド型 TLD を組み合わせた線量計を用いて、超ウラン元素取扱い施設の数カ所において、この組合せ線量計の結果から大まかな中性子スペクトルの情報を得、これをもとに中性子線量当量を求めている。気泡検出器は、1種類は中性子しきいエネルギーが100 keV のものを、もう一つは 1.5 MeV のものを使用している。結果として、ボナーカウンターから得た線量当量と -2% から -13% の誤差で評価できたと報告している。彼はまた、ORNL の第 14 回 PDIS (個人被曝線量計相互比較) において、この組合せ線量計を試験し、低い線量領域において、この組合せ線量計が優れていると報告している。

その他、中性子ラジオグラフィーの検出体としての応用や²⁰⁾、マイクロ波の検出体としての応用²¹⁾なども報告されている。

6. おわりに

気泡検出器は、以上紹介したように、その原理は泡箱に端を発し、APFEL、および ING らの努力によって、中性子を検出する方法として開発、改良され、以下に示

Fig. 10 Re-usability of BDS-1500 using the weekly recompression procedure with the recompression chamber (2.8 MPa, 1 h).¹⁸⁾

す特徴を持っている。

(1) エネルギーが 100 keV から数十 MeV の領域の中性子に対して、従来測定が難しかった、 $10 \mu\text{Sv}$ オーダの線量当量が測定できる。

(2) フレオン 12 を用いた気泡検出器は、エネルギーが 6 MeV 以下のガンマ線に感度がない。したがって、 γ/n 比の高い場所においても、中性子を γ 線と分離して測定できる。

(3) 中性子を被曝直後に、特別の読取装置を必要としないで、簡単に肉眼で中性子の線量当量を知ることができる。

(4) 円筒形や球状の任意の形状、大きさのものを作ることができ、方向依存性を小さくすることができる。

また、今後の改良点、取扱上の注意点として、

(1) 使用温度条件の把握と、温度変化による感度変化の補正を行うこと、また、より使い易いものとするために、感度の温度依存性を改善すること。

(2) 校正に用いた中性子エネルギースペクトルと、使用場所における中性子エネルギースペクトルの違いによる感度校正定数の違いに対する補正を行うこと。

(3) 原理上、温度変化、圧力変化に敏感であるため、使用する環境下における、感度の変化、および経時変化

に伴う感度の変化を確認しておくこと。

などが挙げられる。

気泡検出器を、中性子用の個人被曝線量計として、より利用価値の高いものとするための課題として、

(1) 熱中子から 100 keV の中性子エネルギーに対する感度を高める工夫と、この領域における感度の確認、および反応メカニズムの究明。

(2) 気泡数読取り装置の小型化により携帯可能なものとし、警報機能、線量率表示機能を備えたものとする。などがある。

本解説では、おもに、個人被曝線量計としての観点から気泡検出器を紹介したが、その他の分野での応用例については参考文献を参照頂きたい。

参考文献

- 1) D.A. GLASER; The bubble chamber, *Sci. Amer.*, **192**(2), 46 (1955).
- 2) R.E. APFEL; The superheated drop detector, *Nucl. Instr. Meth.*, **162**, 603 (1979).
- 3) S.C. ROY, R.E. APFEL and Y.C. LO; Superheated drop detector: A potential tool in neutron research, *Nucl. Instr. Meth.*, **A255**, 199 (1987).
- 4) R.E. APFEL and C.S. ROY; Instrument to detect vapor nucleation of superheated drops, *Rev. Sci. Instrum.*, **54**(10), Oct. (1983).
- 5) H. ING and H.C. BIRNBOIM; A bubble-damage polymer detector for neutron, *Nucl. Tracks Rad. Meas.*, **8**(1-4), 285 (1984).
- 6) H. ING; The status of the bubble-damage polymer detector, *Nucl. Tracks*, **12**(1-6), 49 (1986).
- 7) Y.H. KANG, U. HONG, D.S. KIM and K. KATO; Development of the bubble-damage polymer detector, Reprint from the Journal of the Korean Association for Radiation Protection, Vol. 13, No. 1, June (1988).
- 8) イエ・イ・ネシス著、日・ソ通信社翻訳部訳; “液体の沸騰”, p.93 (1973), 日・ソ通信社, 和歌山.
- 9) F. SEITZ; On the theory of the bubble chamber, *Phys. Fluid*, **1**(1), Janu.-Feb. (1958).
- 10) D.R. SISK and C.M. STROUD; Neutron Detection based on Superheated Materials, PNL-SA-17137 (1990).
- 11) 小泉勝三, 星野吉信, 倉林美積; “気泡検出器の試

- 作とその特性試験”, 日本保健物理学会第 26 回研究発表会要旨集, p.4 (1991).
- 12) R.E. APFEL and Y.C. LO; Practical neutron dosimetry with superheated drops, *Health Phys.*, **56**, 79 (1989).
 - 13) H. ING, K. CUNDARI, T. COUSINS; Preliminary Measurement of Radiation from a Critical Assembly using the Bubble Detector, AECL-9336 (1986).
 - 14) R.E. APFEL; Photon-insensitive, thermal to fast neutron detector, *Nucl. Instrum. Method.*, **179**, 615 (1981).
 - 15) O.A. PERKS, R.T. DEVINE and K.G. HARRISON; Neutron dosimetry studies using the New Chalk River Nuclear Laboratories bubble detector, *Radiat. Protect. Dosimetry*, **23**, 131 (1988).
 - 16) H. ING, K. TREMBLAY, A. MORTIMER and E.E. KOVALEY; Preliminary results from bubble detector measurement aboard BIOCOSMOS-2044, Proceedings of the Second Workshop on Microgravity Experimentation, May, 1990, Ottawa, Canada.
 - 17) R.E. APFEL; Newsletter, Vol. 1, No. 1, Apfel Enterprises Inc.
 - 18) J.C. LIU and C.S. SIMS; Characterisation of the Harshaw albedo TLD and the detectors BD-100R and BDS-1500, *Radiat. Protect. Dosimetry*, **32**, 21 (1990).
 - 19) F. D'ERRICO and R.E. APFEL; A new method for neutron depth dosimetry with the superheated drop detector, *Radiat. Protect. Dosimetry*, **30**, 101 (1990).
 - 20) R. ILIC, J. RANT and T. SUTEJ; Fast neutron radiography with a bubble damage polymer detector, 3rd World Conference on Neutron Radiography, Osaka, Japan, May (1989).
 - 21) R.G. OLSEN; Radiofrequency detection by bubble dosimeter, *Radiat. Protect. Dosimetry*, **34**, 381 (1990).