

即発 γ 線と崩壊 γ 線の同時計測を利用した非破壊流体計測法の開発

1. 緒 言

流速や流量などの流体計測にトレーサーを利用する手法は古くから行われ（Somerscales,1981）、例えば、図1に示すように、トレーサーの流動距離（ L_0, L_1 ）と流動時間（ T_0, T_1 ）から平均流速（ V_0, V_1 ）が算定される。RI（Radio Isotope）も、検出が容易であることなどから、トレーサーの一つとして利用され、原子炉などで生産したRIを投入する方法（Clayton and Evans,1968）や、流体に中性子などの量子ビームを打ち込み、核反応により流体内にRIを生成させる方法（Boswell and Pierce,1971）などが報告されている。RIの導入方法には、連続法とパルス法の二種類があり、連続法では、例えば、崩壊 γ 線収量の比（ $\int C_2(t)dt / \int C_3(t)dt$ ）から T_1 を算定する（Boswell and Pierce,1971）。一方、パルス法では、崩壊 γ 線収量の時間スペクトル（ $C(t)$ ）が流体の流動様式などの影響を受けることから、RI導入位置で $C_4(t)$ （図1、以下同様）に示す簡単な形であっても、流れが二相流の場合、検出器前面で $C_5(t)$ のような複雑な形に変化することがある。また、流路途中の配管形状や乱流拡散（Taylor,1954）などにより、 $C_6(t)$ から $C_7(t)$ へと変形する場合も見られる。変形した時間スペクトルの解析方法については多くの報告があり、例えば、核反応 $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$ によって軽水中に生成する ^{16}N を利用するPNA（Pulsed Neutron Activation）法では、Kehler（1983）、Perez-Griffo et.al.（1982）、Gardner et.al.（1996）、Mattsson（2005）他が、質量流速の概念を活用した種々の平均流動時間（ T_0, T_1 ）の算定法を議論した。Mattsson（2005）は、CFD（Computational Fluid Dynamics）により、RIの平均速度と流体の平均速度の違いを明らかにし、その原因の一つとして、生成時のRI分布が一様でない点を指摘した。彼は、PNA実験システム全体の数値モデルに基づいた崩壊 γ 線収量の時間スペクトルの数値シミュレーションの必要性を報告している。流動時間の目安を仮に1～数半減期とすれば、半減期7.13 sの ^{16}N を利用するPNAにおいて数10cm/sの流速を測定する場合、トレーサーの流動距離が概略1 m～数mとなる。すなわち、この流動区間における様々な影響が解析法を複雑にし、この区間をさらに細分化した領域内の情報は得られないという意味において、この区間の大きさが測定空間分解能となる。

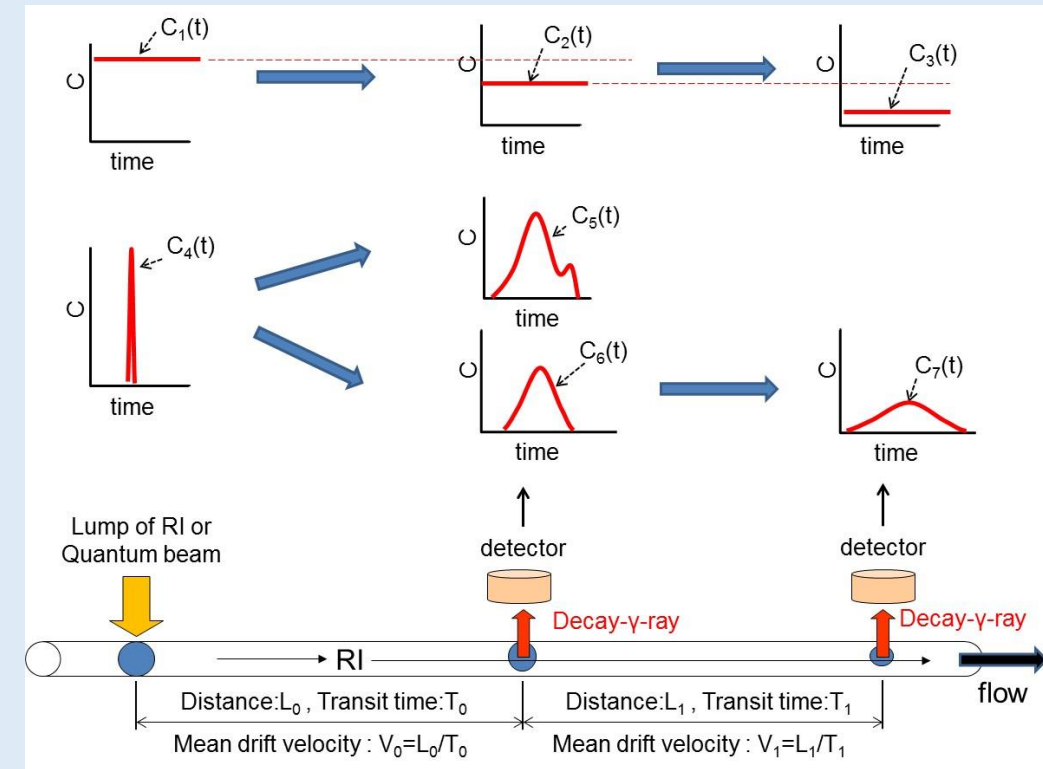


Fig.1 Concept of RI-tracer-technique in flow measurement.

そこで、RIの半減期と流速の積が空間分解能の概略の目安であれば、極短半減期RIの利用により空間分解能が向上し、しかも、流動距離が短くなる分、解析法を複雑にする要因が減るものと考えられる。例えば、潤滑油中の ^{12}C から核反応 $^{12}\text{C}(p,n)^{12}\text{N}$ で生成する ^{12}N を使えば、半減期が11.00 msなので、数10 cm/sの流速を測定する時の流動距離は数mmとなり、数m/sの流速で数cmとなる。すなわち、半減期が数ms～数10 msのRIをトレーサーに使えば、流動距離内における崩壊 γ 線収量の時間スペクトルの変化は無視できる程度と考えられ、RIの挙動と流体の挙動の乖離も従来法に比べて著しく低減できる可能性がある。この距離内での測定は、実質上、 $C_1(t)$ あるいは $C_4(t)$ の測定となり、一定フラックスで量子ビームを照射した場合、 $C_1(t)$ は流体の流速により上下するはずであり、 $C_4(t)$ の形に流速の影響が現れるはずである。筆者は、この着想を基に、幅が数mm以下、流路長が数cm以下の流路に適用でき、ピンポイント測定の可能性もある非破壊流体計測法としてib-DATA (in-beam Double Activation Tracer Analysis) を考案した(掛布, 2014)。ib-DATAでは、流体中に量子ビームを照射し、ビームの照射に伴って放出される即発 γ 線と、ビーム照射により生成されるRIからの崩壊 γ 線をビーム照射領域を包含する若干大きめの領域(以下、検査領域と呼ぶ)で検出する。ib-DATAは、量子ビームの照射中にも γ 線計測を行うことからin-beam、即発 γ 線と崩壊 γ 線の2種類の γ 線を同時計測することからDouble-Activationとして、筆者が命名した。

本研究では、量子ビームをパルス状に照射するPulsed-ib-DATAと連続照射するContinuous-ib-DATAの2種類の手法を開発中であり、本報では、ib-DATAの概要と、流速が一定の場合のContinuous-ib-DATAの測定理論及びその検証実験について報告する。

2. ib-DATAの概要

前述のように、ib-DATAでは、流体中に量子ビームを照射し、検査領域(図2のTest section)からの即発 γ 線と崩壊 γ 線を検出する。ビームの照射方法には、(繰り返し)パルス照射と連続照射の二種類があり、数meV～数10 MeVの中性子ビームや200 MeV程度までの陽子ビームなどを照射する。想定する流速範囲は1 cm/s以下から約10 m/sであり、崩壊 γ 線源として利用するRIの半減期は数ms～数10 msの範囲である。利用可能なRIの主なものを表1に記号Bで示した。 ^{12}B と ^{12}N は、有機材料など炭素を含む流体でトレーサーとして利用でき、崩壊後の娘核が共に ^{12}C であるため、崩壊 γ 線は同じものとなる。 ^{24}mNa や ^{205}mPb は、Al、Mg、NaおよびPbの金属流体およびそれぞれを含む流体で利用できる。即発 γ 線の源は、高エネルギー入射量子については、主に流体中原子核との非弾性散乱があり、(n,p)反応や(p,n)反応など、通常の核反応に伴って放出される即発 γ 線も利用できる。熱中性子を利用する場合は、(n, γ)反応により発生する即発 γ 線(Molnar, 2004)が利用できる。

基本的な解析方法として、図2に示した4種類が考えられる。1st-methodでは、パルス幅が1 ms～数msのビーム照射に対して、崩壊 γ 線収量 $C_8(t)$ (図2、以下同様)と即発 γ 線収量 $C_{10}(t)$ を解析する。 $C_8(t)$ と $C_{10}(t)$ はパルス照射毎に追跡し、追跡時間の目安を γ 線強度が1%以下となる時間(RIの半減期の7倍程度)とすれば、例えば、 ^{12}N を利用する場合、図中の横軸(time)の最大値は概略80 msとなる。 $C_8(t)$ を対数で表すと、流れの無い場合は、半減期に対応した傾きを持つ直線($C_9(t)$)となる。流れが有る場合は、 $C_8(t)$ が流速分布を反映した曲線となるので、 $C_8(t)$ を解析することにより流速分布が分かり、平均流速も算定することができる。

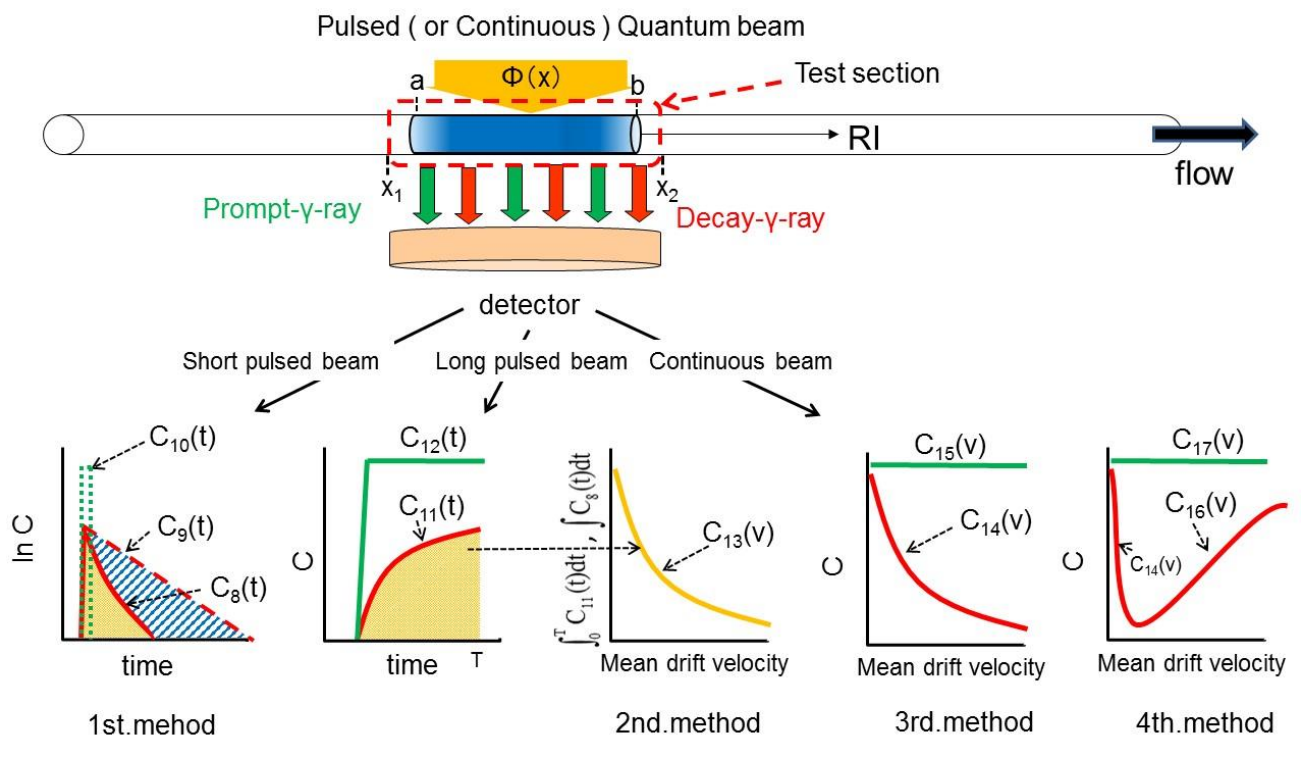


Fig.2 Concept of ib-DATA

さらに、検査領域の下流側端面の面積を確定できれば、 $C_9(t)$ と $C_8(t)$ の差から質量流量が分かる可能性がある。2nd-methodでは、数100 ms～1 s程度の時間Tのビーム照射に対して、平均流速ごとに $C_{11}(t)$ を積分した $C_{13}(v)$ を解析する。 $C_{13}(v)$ は、流速が速く、流出量の多い場合ほど小さくなるので、流速の推定に利用可能と考えられる。さらに、1st-methodで得られる $C_8(t)$ の積分値を $C_{13}(v)$ に利用することもできる。ここで、実測する $C_8(t)$ や $C_{11}(t)$ は流体密度に比例し、流速の他、流動様式や温度など様々な要因で変動するため、その変動の影響を即発 γ 線収量の $C_{10}(t)$ 、 $C_{12}(t)$ を使って補正する。即発 γ 線の多くは、核反応後の 10^{-9} 秒以内の短時間に放出されるので、流速が数10 m/s程度の流体は、この間、事実上静止しており、即発 γ 線収量は正確に原子核数を反映するものと考えられる。

なお、 $^{12}\text{C}(p,n)^{12}\text{N}$ と $^{12}\text{C}(n,p)^{12}\text{B}$ では、前述のように、 ^{12}N と ^{12}B の崩壊先が ^{12}C であり、崩壊 γ 線と即発 γ 線の源が共に ^{12}C 原子核の励起準位となるため、 γ 線エネルギーでは両者を区別できない。このような場合、特に、 γ 線の発生時刻で区別するため、Pulsed-ib-DATAを使う必要がある。

Table1 List of main nuclear reactions used in ib-DATA						
Target (A) :natural abundance(%)	Main reaction			Radio Isotope (B)		
	A(a,b)B	σ (barn) †1	Ea(MeV) ※1)	B	Half life	E γ (MeV)※1)
12C: 98.892	12C(n,p) 12B	0.01~0.026	16~20	12B	20.4ms	3.215
	12C(p,n) 12N	0.0035~0.004	20~30	12N	11.00ms	4.438
27Al: 100	27Al(n, α) 24mNa	0.035~0.17	10~20	24mNa	20.2ms	0.472
24Mg: 78.6	24Mg(n,p) 24mNa	0.08~0.3	10~20			
23Na: 100	23Na(n, γ) 24mNa	~0.528	thermal※1)			
206Pb: 24.10	206Pb(n,2n) 205mPb	1.1~2.3	10~20	205mPb	5.54ms	0.988

※1) Ea: Incident quantum energy, E γ : Emitted γ -ray energy, thermal: thermal neutron
†1) <http://www.nndc.bnl.gov/sigma/index.jsp?as=204&lib=endfb7.1&nsup=10>

一方、Continuous-ib-DATAでも、大きく2種類の解析方法が考えられ、3rd-methodでは、平均流速毎の崩壊 γ 線収量 $C_{14}(v)$ を即発 γ 線収量 $C_{15}(v)$ で補正した検量曲線を予め求めておき、実測される崩壊 γ 線収量と即発 γ 収量から平均流速を求める。流速が一定の場合について、その詳細を次章以降で議論する。4th-methodでは、 $C_{16}(v)$ と $C_{17}(v)$ を使い、表1のRIが使えない流体で、しかも、流出したRIの一部が崩壊せずに検査領域に戻ってくる場合の流体計測を想定している。

例えば、冷凍サイクルである。HFC134a ($\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$) の場合、表2に示す核反応 $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ により ^{16}N をRIトレーサーとして生成させる。この場合、約5 MeVにピークを持ち、最大10 MeVのエネルギースペクトルを持つ中性子ビームを照射することにより、約10.2 MeVに閾値を持つ核反応 $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$ の発生を抑え、冷媒に混入している潤滑油には反応せずに、冷媒だけを選択的に追跡する測定ができる。しかし、冷凍サイクルのように数10 cmを越える長い距離をRIが流動するため、 $C_{16}(v)$ の解析では、RIの蓄積過程に加え、流体の離合集散や相変化なども考慮する必要があり、前述のKehler（1983）やPerez-Griffo.et.al.（1982）らによる質量流速の概念を使った解析理論の構築が必要になる。なお、一般的に、軽水中の ^{16}N など、表2に示した数100 ms～数秒の半減期を持つRIには、2nd-methodあるいは4th-methodを利用する。

Table2 List of other nuclear reactions using in ib-DATA						
Target (A) :natural abundance(%)	Main reaction			Radio Isotope (B)		
	A(a,b)B	σ (barn)	Ea(MeV)	B	Half life	E γ (MeV)
16O: 99.759 19F: 100	16O(n,p) 16N	0.01～0.16	11～28	16N	7.13s	6.13
	19F(n, α) 16N	0.1～0.294	4.3～8.6			
204Pb: 1.40	204Pb(n,2n) 203mPb	1～2.2	10～20	203mPb	6.2s	0.8252
208Pb: 52.3	208Pb(n,2n) 207mPb	1.2～2.3	10～20	207mPb	0.805s	0.56967 1.06362
30Si:3.12	30Si(n,p) 30Al	0.18	14	30Al	3.69s	1.263 2.235
35Cl:75.53	35Cl(n,2n) 34Cl	0.012	14	34Cl	1.53s	0.511
41K:6.77	41K(n, α) 38mCl	0.011	14	38mCl	0.72s	0.6713
79Br:50.69	79Br(n,n') 79mBr	0.45	～14	79mBr	4.9s	0.2072
124Sn:5.8	124Sn(n,p) 124In	0.9	14.1	124In	3.17s	1.132
197Au:100	197Au(n,n') 197mAu	0.53	～14	197mAu	7.8s	0.2789
37Cl:24.47	37Cl(n, γ) 38mCl	0.005	thermal	38mCl	0.72s	0.6713
115In:95.77	115In(n, γ) 116m2In	92	thermal	116m2In	2.16s	0.16239
32S:95	32S(γ ,n) 31S	0.019	20.1	31S	2.6s	0.511
40Ca:96.97	40Ca(γ ,n) 39Ca	0.015	19.3	39Ca	0.87s	0.511

また、図3は、ピンポイント測定の可能性を模式的に示したものである。ib-DATAで中性子を照射した場合、通常、ビームは流体を突き抜け、得られる情報は流体内のビーム経路に沿った平均値となる。しかし、図のように、SPECT (Single photon emission computed tomography) などを用いられるコリメータにより検出 γ 線の発生領域を限定できれば、ピンポイントで情報が得られる可能性がある (図3(a))。さらに、荷電粒子線を照射する場合は、例えば、RIトレーサーに ^{12}N を使う場合、 $^{12}\text{C}(p,n)^{12}\text{N}$ 反応が約20 MeVの閾値を持つので、陽子エネルギーが閾値まで低下した深さで核反応が止まる。そこで、単色エネルギーの陽子ビームを試料に照射し、ビームの途中で適切な厚さのエネルギーロス板を出し入れすると、反応の停止位置を意図的に前後させることができ、両者の差分からピンポイントで流速に関する情報が得られる可能性がある (図3(b))。

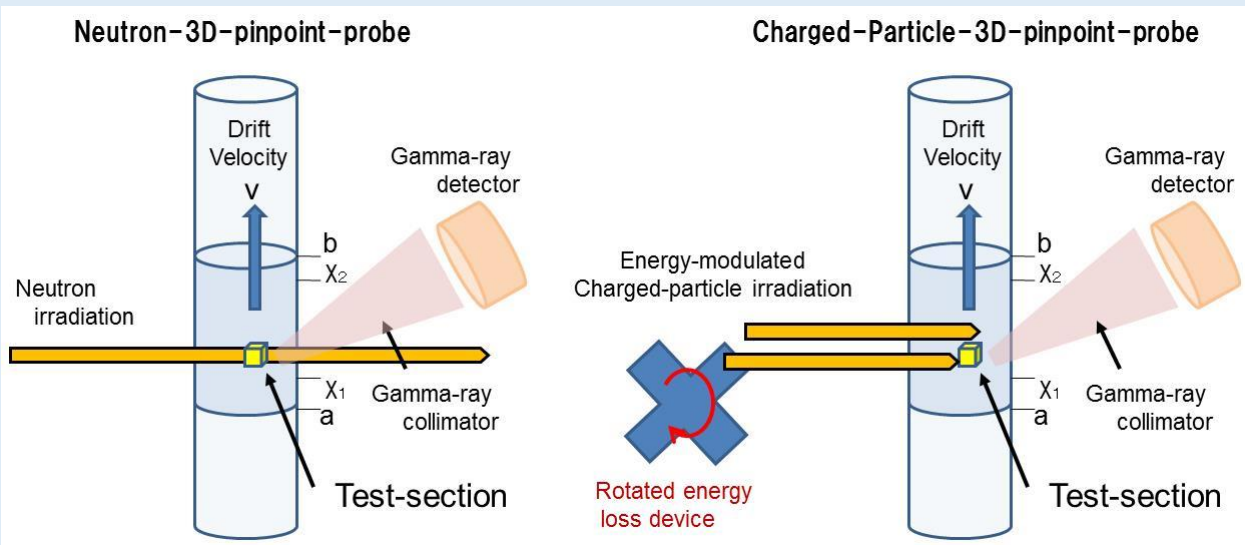


Fig.3 Concept of 3D-pinpoint-ib-DATA

3. 流速が一定の場合についてのContinuous-ib-DATA (3rd.method) の測定理論

流体に量子ビームを連続的に打ち込むContinuous-ib-DATAでは、検査領域内のRI蓄積量を使って流速を推算する。RI蓄積量も崩壊 γ 線収量を使って測定でき、前述のPulsed-ib-DATAと同様に、即発 γ 線収量により流体密度の変動を補正する。崩壊 γ 線収量と流速の関係を明らかにする計算モデルと計算の考え方を図4に示した。モデル (2) が最も基本的な、流速が一定の場合についてのContinuous-ib-DATAの例である。このモデルでは、流速 v で流れる流体の検査領域 (幅 L_0 の区間 ($0 \sim L_0$)) にフラックス ϕ ($x \leq 0$ と $L_0 \leq x$ において、 $\phi=0$) の量子ビームを照射し、検査領域内からの崩壊 γ 線を γ 線検出効率 η ($x \leq 0$ と $L_0 \leq x$ において、 $\eta=0$) で計測する。検査領域にはRI生成に関わる原子核が全体で N_0 個存在し、一様に分布しているものとする。流体内の微小幅 Δx のスラブAは、検査領域内に進入後、位置 x に到達するまでの時間 T_x の間、一定してフラックス ϕ のビームを浴びる。この状況は、モデル (1) に示した静止スラブに定常的にビームを照射する場合と等価と考えられ、スラブA内のRI蓄積量は微分方程式 (1) を解いた (2) 式で計算できる。これにより、 $N \rightarrow (N_0/L_0)\Delta x$, $t \rightarrow T_x$, ならびに、 $n(t) \rightarrow \Delta n(x)$ と置き換え、微小RI蓄積量 $\Delta n(x)$ が (3) 式で計算できる。従って、検査領域全体の崩壊 γ 線収量は、 $\Delta n(x)$ を区間 ($0 \sim L_0$) について総和を求め、崩壊定数 λ , γ 線放出率 ε , ならびに γ 線検出効率 η を掛けた (4) 式で計算でき、 $\Delta x \rightarrow 0$ とすることにより、(5) 式が得られる。

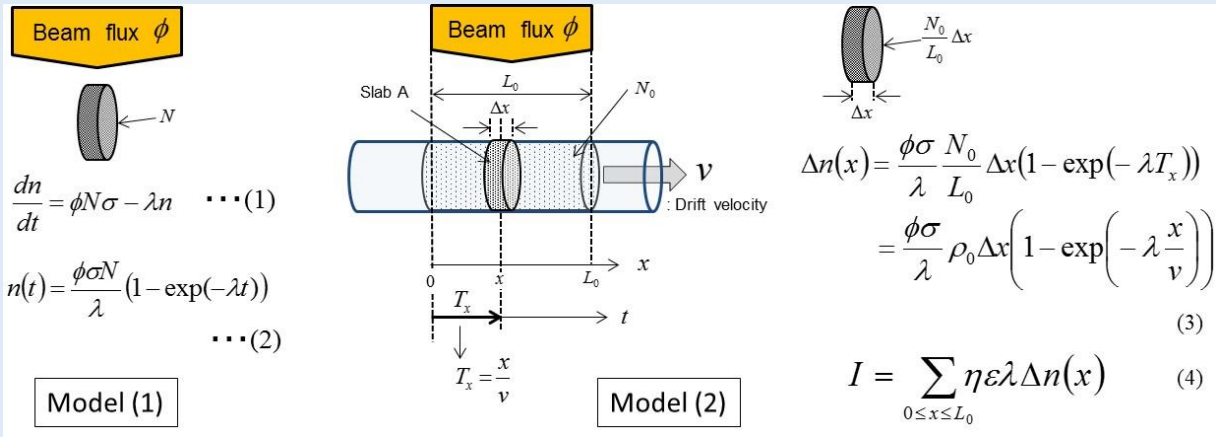


Fig.4 A simple calculation model and equations of Continuous ib-DATA. N is number on nuclei. N_0 is number on nuclei in wide of L_0 . $\rho_0 = N_0/L_0$ is number density of nuclei (1/cm), $\phi(x)$ is quantum beam flux (1/cm²/s), σ is nuclear reaction cross section (barn: 10⁻²⁴cm²), λ is Decay constant (1/s), and ε is Branching ratio of Emitted γ -ray, η is γ -ray detection efficient, and I is Decay γ -ray yield.

$$I = \varepsilon \eta \phi \sigma \rho_0 \int_0^{L_0} \left(1 - \exp \left(-\lambda \frac{x}{v} \right) \right) dx = \varepsilon \eta \phi \sigma \rho_0 \left\{ L_0 - \frac{v}{\lambda} \left(1 - \exp \left(-\lambda \frac{L_0}{v} \right) \right) \right\} \quad (5)$$

(5) 式に見られるように、 I は流体密度を表す ρ_0 に比例し、前述のように、流体密度とともに変動する．そこで、 ρ_0 の変動をビーム照射時の即発 γ 線収量を使って検出し、 I を補正する．今、即発 γ 線を放出する励起準位の寿命を τ' とすれば、 τ' は概略 $10^{-15} \sim 10^{-9}$ sであるので、崩壊定数 $\lambda' (=1/\tau')$ は $10^9 \sim 10^{15}$ 1/sとなる．このため、(5)式右端の指数関数項はほとんど0となることから1と比較して無視でき、さらに、 v/λ も概略 10^{-6} cm以下となって L_0 と比較して無視できるので、(5)式の積分計算後の括弧内は L_0 だけが残る．従って、即発 γ 線の生成に(関わる原子核の単位長さ当たりの数を ρ_0' 、生成核反応断面積を σ' 、 γ 線放出率を ε' 、ならびに γ 線検出効率を η' とすれば、即発 γ 線収量 I' は、(6)式で表される．そこで、 R を(7)式で定義し、(5)式と(6)式の比をとると(8)式が得られる．(8)式の ρ_0/ρ_0' は、崩壊 γ 線と即発 γ 線が同じ分子から放出される場合、流体の成分数や流動状態に関係なく常に一定となる．また、両者が異なる分子から放射される場合でも、流体が多成分で、しかも、検査領域内で相変化を起こす場合を除けば、やはり定数となると考えられる． η/η' も、相変化に伴う自己吸収率の変動が無ければ、一定と考えられる． ε 、 σ および λ は各原子核固有の物理量であり、 L_0 は測定の設定アップで決まるので、これらの値はすべて一定となる．従って、(8)式において変数となるのは流速 v だけであり、崩壊 γ 線収量と即発 γ 線収量の比 I/I' を測定すれば、(8)式を使って、流速 v を推定できる．

$$I' = \varepsilon' \eta' \phi \sigma' \rho_0' L_0 \quad (6)$$

$$R = \frac{1}{L_0} \left\{ L_0 - \frac{v}{\lambda} \left(1 - \exp \left(-\lambda \frac{L_0}{v} \right) \right) \right\} \quad (7)$$

$$\frac{I}{I'} = \frac{\varepsilon \eta \sigma \rho_0}{\varepsilon' \eta' \sigma' \rho_0' L_0} \left\{ L_0 - \frac{v}{\lambda} \left(1 - \exp \left(-\lambda \frac{L_0}{v} \right) \right) \right\} = \frac{\varepsilon \eta \sigma \rho_0}{\varepsilon' \eta' \sigma' \rho_0'} \cdot R \quad (8)$$

図5に、 L_0 とRIの半減期（半減期を $T_{1/2}$ として、 $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$ ）をパラメータとして、 v を変化させたときの R の計算結果（ $v=10$ cm/s で規格化）を示す．半減期が短いほど、また、 L_0 が長いほど、曲線が緩やかになる様子が分かる．低流速域ほど γ 線収量が大きく、統計誤差が小さくなるので、流速の推定精度が高くなる．逆に、高流速域では、流速の推定精度が低くなる傾向が分かる．

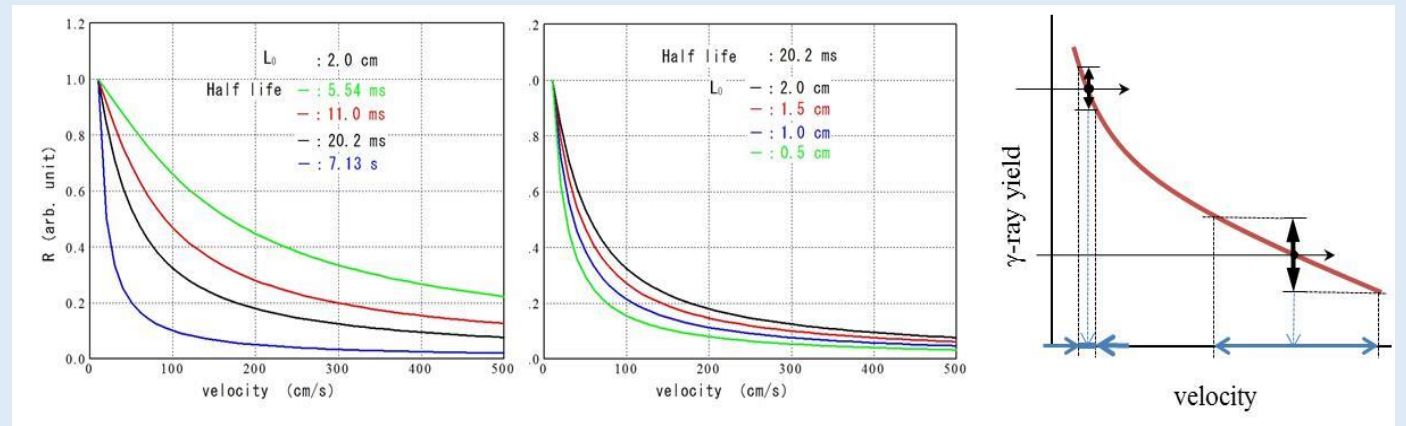


Fig.5 Some calculation results of equation (10) in Continuous ib-DATA.

図6のモデル (3) は、量子ビームフラックスに分布 $\phi(x)$ (モデル (2) と同様、 $x \leq a$ と $b \leq x$ において、 $\phi(x)=0$ とする) がある場合の計算であり、区間 ($x_1 \sim x_2$) を検査領域として、崩壊 γ 線を γ 線検出効率 $\eta(x)$ ($x \leq x_1$ と $x_2 \leq x$ において、 $\eta(x)=0$) で計測する。この時、区間 ($a \sim b$) にはRI生成に関わる原子核が全体で N_0 個存在し、一様に分布しているものとする。位置 z の微小幅 Δx のスラブAが微小距離 Δz を移動する微小時間 $\Delta t (= \Delta z / v)$ にスラブ内に生成するRIの量は $(N_0 / L_0) \Delta x \sigma \phi(z) \Delta t$ であり、RI量は位置 x まで進む時間 $T_D (= (x-z) / v)$ 間にRIの一部が崩壊することにより $\exp(-\lambda T_D)$ 倍に減少する。さらに、位置 x の微小幅 Δx の領域には、区間 ($a \sim x$) で生成し、崩壊せずに到達するRIが蓄積され、その微小蓄積量 $\Delta n(x)$ は、(9) 式で表される。これにより、検査領域全体の崩壊 γ 線収量 I は、 $\Delta n(x)$ に、崩壊定数 λ と γ 線放出率 ε 、ならびに γ 線検出効率 $\eta(x)$ を掛けて、区間 ($x_1 \sim x_2$) について総和を求めればよく、(10) 式で表される。従って、検査領域全体の崩壊 γ 線収量 I は、 $\Delta z \rightarrow 0$ として、区間 ($a \sim x$) で z について積分の後、 $\Delta x \rightarrow 0$ として、区間 ($x_1 \sim x_2$) で x について積分すればよく、(11) 式で計算できる。($b \leq x$ において、 $\phi(x)=0$ としたので、(11) 式には、 b は陽に現れない。) 。

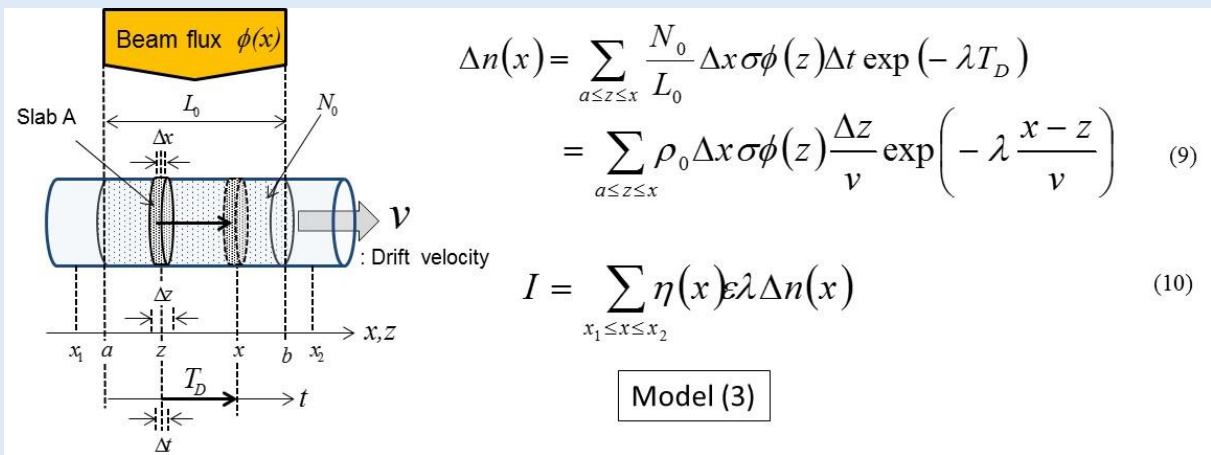


Fig.6 A calculation model and equations of Continuous ib-DATA. N_0 is number on nuclei in wide of L_0 , $\rho_0=N_0/L_0$ is number density of nuclei (1/cm), $\phi(x)$ is quantum beam flux(1/cm²/s), σ is nuclear reaction cross section(barn:10⁻²⁴cm²), λ is Decay constant(1/s), and ε is Branching ratio of Emitted γ -ray, $\eta(x)$ is γ -ray detection efficient, and I is Decay γ -ray yield.

即発 γ 線収量による補正は、モデル(2)の(8) 式と同様に計算できる。すなわち、前述のように、即発 γ 線を放出する励起準位の崩壊定数 λ' は10⁹~10¹⁵ 1/sであるので、(11) 式内の指数関数項は、 v を10³ cm/s のオーダーとしても、 $(x-z) \leq 10^{-6} \sim 10^{-12}$ cmの範囲だけで有意な値を持ち、しかも、 $0 \leq (x-z)$ であるので、その値は1以下である。従って、この範囲では、 $\phi(z)$ は一定値 $\phi(x)$ として良く、(12) 式が得られる。ここで、「 $'$ 」の付いた物理量はすべて即発 γ 線の発生に関わるものであることを表す。さらに、前述のように、区間 ($x_1 \sim a$) では $\phi(x)=0$ としているので、(12) 式内の指数関数項は、 v を10³ cm/s のオーダーとしても、 $(x-a) \leq 10^{-6} \sim 10^{-12}$ cmの範囲だけで有意な値を持ち、実用上0と考えられ、(13) 式が得られる。従って、(8) 式と同様の I と I' の比は、(14) 式で表される。

$$I = \frac{\varepsilon \lambda \rho_0 \sigma}{v} \int_{x_1}^{x_2} \eta(x) \left\{ \int_a^x \phi(z) \exp\left(-\lambda \frac{x-z}{v}\right) dz \right\} dx \quad (11)$$

$$I' = \varepsilon' \rho_0' \sigma' \int_{x_1}^{x_2} \eta'(x) \phi'(x) \left\{ 1 - \exp\left(-\lambda' \frac{x-a}{v}\right) \right\} dx \quad (12)$$

$$I' = \varepsilon' \rho_0' \sigma' \int_{x_1}^{x_2} \eta'(x) \phi'(x) dx \quad (13)$$

$$\frac{I}{I'} = \frac{\varepsilon \rho_0 \sigma}{\varepsilon' \rho_0' \sigma' \int_{x_1}^{x_2} \eta'(x) \phi'(x) dx} \int_{x_1}^{x_2} \eta(x) \left\{ \int_a^x \phi(z) \exp\left(-\lambda \frac{x-z}{v}\right) dz \right\} dx \quad (14)$$

さらに、 $^{12}\text{C}(\text{p},\text{n})^{12}\text{N}$ 反応は、約20MeVの閾値を持ち、試料に入射後、陽子エネルギーが閾値まで低下した時点で核反応が止まる。そのため、適切な厚さのエネルギーロス板の出し入れにより、反応の停止位置を意図的に前後させることができ、両者の差分からピンポイントで流速に関する情報が得られる可能性がある。コリメータなどにより検出 γ 線の発生領域を限定できれば、エネルギー変調のできない中性子入射のib-DATAでもピンポイントあるいは1次元の流速分布測定ができるかも知れない（図7）。

エンジンやミッション、デフギアなど、油を多く使う機器では、油量を減らすことにより機器の重量や攪拌損失を減らすことができるため、最適な油量を調べるCAEの構築が進められている。そこでは、その高精度化のため、模擬実験装置や透明窓を持つ実機にレーザードップラー速度計や粒子イメージング流速計測法を駆使した流速分布測定などが行われているが、油と窓との摩擦特性などが実際と異なるため、最終的には何も手を加えていない実機での検証が不可欠となる。最低1点で流量などを測定したい。種類によるが、例えばデフギアの外壁には厚さ5mm程度のアルミ合金が使われており、鋳鉄の場合も考慮すると、量子ビームが壁を貫通する必要から、陽子の場合、150～200MeVの入射エネルギーが欲しい。中性子は、表1のエネルギーで十分透過する。量子ビームのエネルギーは、必ずしも単色である必要はなく、表1で示したような数MeVのエネルギーの広がりがあっても構わない。パルスの時間幅は1ms以下が欲しいが、 γ 線検出器系の最大計数率との兼ね合いもあり、検討を要する。

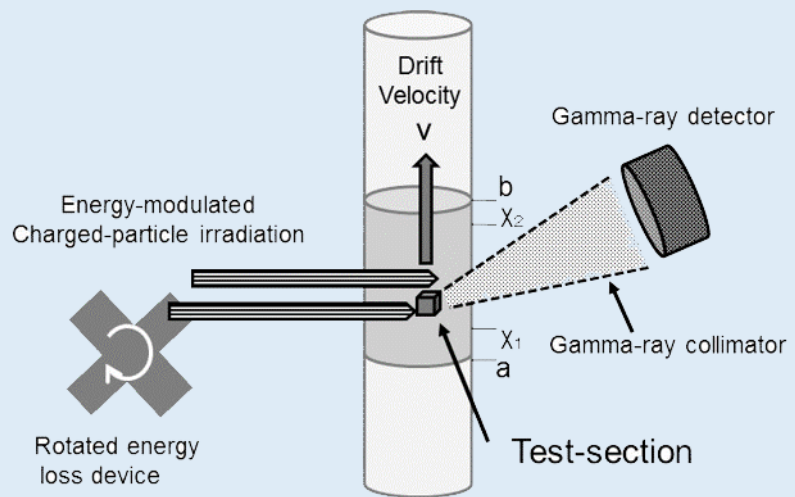


Fig.7 Concept of 3D-pinpoint-ib-DATA

$^{16}\text{O}(\text{n},\text{p})^{16}\text{N}$ と $^{19}\text{F}(\text{n},\alpha)^{16}\text{N}$ は、冷却水やフッ素原子を含む冷媒の流動解析に非常に都合が良い。 $^{16}\text{O}(\text{n},\text{p})^{16}\text{N}$ 反応が約10MeVの閾値を持っているので、10MeV以下のエネルギーの中性子を使えば、フッ素だけから ^{16}N を作ることができる。冷媒と一緒に流動するコンプレッサー用潤滑油に酸素原子が含まれていても、冷媒だけを選択的に追跡できる。ただし、 ^{16}N の半減期が7.13sと長いため、数cm/s以上の流速測定には大量にRIを生成させる必要があり、Continuous-ib-DATAによるS/N比の向上が不可欠と考えられる。（1）式に見られるように、 λ/v の値が同じ場合、崩壊 γ 線収量の減少曲線が概略同じ形になる。いわゆるスケーリング則が成り立つので、測定したい流速に適した大きさの崩壊定数（ λ ）を持つRIが流体の構成元素内に見つかる助かる。この他、 $^{27}\text{Al}(\text{n},\alpha)^{24\text{m}}\text{Na}$ 反応はアルミダイキャストのアルミ溶湯の流動解析に、 $^{23}\text{Na}(\text{n},\gamma)^{24\text{m}}\text{Na}$ 反応は、ナトリウム熱媒体を利用するタイミングバルブ内部の流体解析に使いそうである。

4. さらなる展望

エネルギー分野では、 $^{23}\text{Na}(\text{n},\gamma)^{24\text{m}}\text{Na}$ 反応が高速増殖炉におけるナトリウムループの非接触モニターや流動解析¹⁴⁾に、 $^{206}\text{Pb}(\text{n},2\text{n})^{205\text{m}}\text{Pb}$ 反応などがレーザー核融合炉のPbLiブランケットでの鉛流動解析¹⁵⁾に使えないだろうか。さらには、動植物や人間（医療）を対象とした研究に活用できる可能性もある。流出トレーサーにRIが使えない場合、遅延蛍光、燐光の他、緩和時間が数100 μs ～数100msの現象が利用できれば何でも良い。緩和時間の異なる二つ以上の現象を同時に検出できれば良い。レーザー光子やレーザー加速電子線、あるいはその制動X線など、LDNS周辺への期待は非常に大きい。時間分解能、空間分解能、S/N比、測定時間等、一つの測定原理が技術として成り立つためには多くの要件があり、その活躍には、LDNSのような新しい装置の誕生が不可欠である。例えば、LDNSのBeam-headで使う高速中性子源として、 $^2\text{H}(\text{d},\text{n})^3\text{He}$ 反応を利用できないだろうか。この反応では、入射重陽子のエネルギーが10MeVを超える辺りから、発生する高速中性子の大部分が前方に偏る¹⁶⁾。この特長を利用すれば、中性子を有効に利用できるだけでなく、側方に出る中性子量が減少する分、遮蔽を小さくできる可能性がある。 γ 線の遮蔽に課題が残るものの、Beam-headの小型軽量化が期待できる。高速中性子のエネルギーは10～20MeV以上となるが、表1に示した多くの核反応には都合が良い。

筆者は、かつて、NRGの技術革新としてIn-house InspectionからField Inspectionへの広がりを指摘したが¹⁷⁾、自動車業界に限って言えば、30年近くの歳月を経た現在も、その広がりには遅々として進んでいない。車作りにも「原理原則に基づくものづくり」が必要とされ¹⁸⁾、先ず、現場に赴き、ものづくりの実態を把握することから始める必要がある。そのためにも、LDNSによる中性子利用のField Inspectionへの広がり期待したい。また、分析試料の「動き」の多くは測定誤差の要因と見なされるが、ib-DATA解析により新たな情報源になり得る。LDNSを持って工場や実験室の外へ出たとき、分析装置の前を走って逃げる分析試料がいても良いのではないか。

文 献

Somerscales,E.F.C., Tracer Methods, Emrich,R.J., edit., Volume 18, Fluid Dynamics Part A,pp.1–240., Marton.L. and Marton.C., edit.–in–Chief, Methods Of Experimental Physics, Academic Press,(1981).

Clayton,C.G. and Evans.G.V., The constant–rate–injection and velocity methods of flow measurement for testing hydraulic machines. AERE–R 5872,(1968).

Boswell.C.R., and Pierce.T.B., Flowrate determination by neutron activation analysis, Modern Development in Flow Measurements, Conf. Publ., 10, pp.264–272, Peter Peregrinus Ltd,(1971).

Taylor,G., The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe.,(1954).

Kehler, P., Use of pna techniques for two—phase flow characterization. United States: Hemisphere Publishing. (1983).

Perez–Griffo.M.L., Block.R.C., and Lahey.R.T.Jr., Measurement of flow in large pipe by the pulsed neutron activation method, Nuclear Science and Engineering,82,pp.19–33,(1982).

Gardner,R.P., Barrett,C.L., Haq,W. and Peplow,D.E., Efficient monte carlo simulation of ^{16}O neutron activation and ^{16}N decay gamma–ray detection in a flowing fluid for on–line pxygen analysis or flow rate measuremaent, Nucler Science and Engineering, 122,pp.326–343, (1996).

Mattsson,Hakan., Pulsed neutron activation for determination of water flow in pipes, THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY, CTH–RF–196, Nuclear Engineering CHALMERA UNIVERSITY OF THECNOLOGY, Goteborg, Sweden, (2005).

掛布光孝，流動指標値特定方法および流動指標値特定装置，特開2014–52205(P2014–52205A),(2014).

Molnar,G.L., Handbook of Prompt Gamma Activation Analysis with Neutron Beams, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS,(2004).

松江秀明，“中性子即発ガンマ線分析による非破壊元素分析”，非破壊検査，第60巻2号，(2011),pp.98–105.