

自動車業界におけるレーザー駆動中性子源の新しい活用法

掛布 光孝

(株)豊田中央研究所 (〒480-1192 愛知県長久手市横道41番地の1)

New Applications of Laser-Driven Neutron Sources in the Car Industry

Mitsutaka KAKENO

TOYOTA CENTRAL R&D LABS., INC., 41-1 Yokomichi, Nagakute, Aichi 480-1192

(Received November 10, 2014)

New applications of LDNS (Laser-Driven Neutron Sources) are described. One of them is ib-DATA (in-beam Double Activation Tracer Analysis) with which we can measure mean drift velocity and mass flow rate in a variety of fluid. In ib-DATA, LDNS with very light and compact beam-head will be constructed to shoot pulsed neutrons into the fluid in pinpoint.

Key Words: Neutron radiography, Pulsed neutron activation, Drift velocity, Mass flow rate

1. はじめに

自動車は2万とも3万とも言われる膨大な数の部品から成り¹⁾, その素材, 機能, 大きさなどは実に様々である。そうした自動車部品と中性子との関わりもまた多種多様であり, 生産, 分析, 計測, 検査などいろいろな分野に及ぶ。

生産分野では, 高品位のn型シリコン単結晶が原子炉による中性子照射で生産され, それを素材とするパワーデバイスが車載モーターの制御回路に使われている¹⁾。大地震等の災害により原子炉が長期間停止する現状を考えると, 素材の安定供給の点からも, LDNS (Laser-Driven Neutron Sources) に寄せる期待は大きく, 効率的な中性子照射場の開発が待たれる²⁾。

分析分野では, 2008年に日本原子力研究開発機構と高エネルギー加速器研究機構が共同で稼働させたパルス中性子源J-PARC/MLF (Japan Proton Accelerator Research Complex/ Materials and Life Science Facility) の存在が大きい。車載用二次電池や燃料電池の電極材料解析, 各種鋼材の残留応力測定などが多く行われている³⁾。また, 2014年には同施設に物質情報3次元可視化装置「RADEN (螺鈿)」が設置され, 飛行時間法を使ったエネルギー分析型イメージングが可能となった¹²⁾。これにより, 偏極単色中性子を使った磁場の強さや方向の測定が可能となり, また, 中性子の共鳴吸収を使った物質内部の温度分布や元素分布の測定もできるようになる⁴⁾。将来, 車載モーター内部

の磁場分布やパワーデバイスユニット内部の温度分布のイメージングが可能となるかも知れない。さらに, ブラッグカットオフ波長を使えば, 上記の残留応力の2次元分布をイメージングとして捉えることができる⁵⁾。今後, 高性能なLDNSの実現により, J-PARC/MLFを小型化したような中性子源が大学や企業の研究室に普及することが期待される。その際には, 多少性能が低くても構わない。タイムリーに, 先ず, 手元の装置で分析し, 必要に応じて高性能な施設を利用すれば良いからである。しかし, 分析試料のように装置に合わせて分解できる部品ばかりではない。対象に合わせ, 装置が変わる必要がある。

本稿では, 「計測」, あえて誤字を使えば, 側に立って計る「計側」の立場から流体計測分野周辺において実現して欲しい装置とその応用について解説を試みる。

2. 任意周波数の極短パルス発生を活用した撮像 周波数連続可変型NRG装置

前述のように, J-PARC/MLFを小型化したような中性子源が普及すれば, 大学や企業の研究室で, タイムリーにNRG (Neutron Radiography) が実施できるようになる。しかし, パルスが一定周波数 (RADENでは25 Hz) の場合, パルス周波数と異なる周期的現象の実時間撮影には, 一工夫が必要となる。エネルギー分布を持つパルス中性子は, パルスが発生した瞬間から, エネルギーの高

¹¹ URL: <http://www.suzuki.co.jp/cpd/kids/>

¹² URL: http://kaihoken.nuclear.jp/H26nuclearmeeting_output/kiyanagi/total_kiyanagi.pdf

い、すなわち飛行速度の大きな中性子から順次試料に到達するので、映像の全てのコマに同じ飛行時間の中性子を使えば前述のエネルギー分析型撮影になるが、飛行時間が変動すると、コマ毎に中性子のエネルギーとフラックスが変わってしまう。そのため、一コマ毎に、中性子の到着時刻から撮像に使った中性子のフラックスとエネルギーを特定して、それらに起因するコントラストの変動を補正する必要が生じる。その補正が可能であれば、撮像周波数を現象の周波数に合わせ、原理的には、任意の周波数の実時間撮影が可能となるが、様々な周波数特性を持つ流動現象の撮影には、現実的な手法とは言い難い。

そこで、実現が期待されるのが、kHzに近い任意周波数の極短パルス発生が可能で、周波数連続可変型のLDNSである。パルス周波数と撮像周波数を撮影する現象の周波数に同期させることができれば、さらに、パルスビームが重畳せず、適度なエネルギー分布を持つNRG装置ができれば、様々な周期的現象のエネルギー分析型撮影が可能となる。その場合、最適なコントラストが得られる中性子エネルギーの探索が可能となる上、過渡現象の解明にも都合がよい。減速体系を使って低エネルギー中性子を得る場合、減速時間で中性子ビームのパルス幅が変化するので、中性子の生成核反応と減速体系の最適化が今後の重要な課題となる。中性子発生量については、試料位置で、 $10^8 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ 以上の中性子フラックスが期待される。

3. 軽量レーザービーム輸送系を活用した可動ヘッド型NRG装置

NRGは、文字通り透過撮影なので、流路が折り重なると、複数の透過像が重畳して、現象の把握が困難となる。そこで期待されるのがCT撮影である。通常の据え置き型中性子源では、Fig. 1の①に示すように、水平方向の断層像が得られ、被写体の上下スキャンで得られる3次元CT像から着目部位を含む任意断面像を抽出する。しかし、多くの場合、部品全体のCT像を必要としない上、中性子が透過できずCT撮影が不可能な場合も多

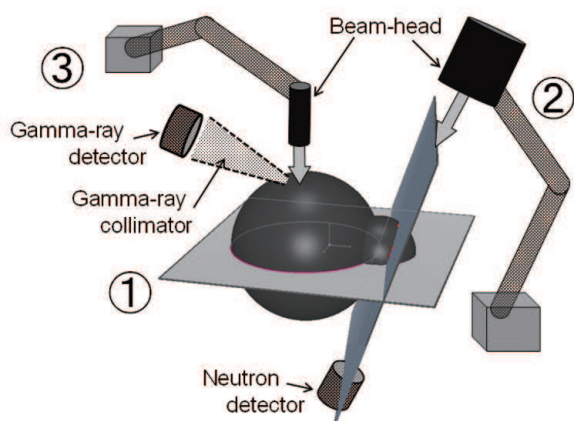


Fig. 1 Concept of Local-CT (②) and one-side measurement (③).

い。そこで、期待されるのが、Fig. 1の②の様に、例えば、ロボットアームの先に装着可能な中性子ビーム発生部(仮に、Beam-headと呼ぶ)を持つLDNSである。Beam-headは、利用する中性子生成核反応の種類と取り出す中性子ビームのエネルギースペクトルを基に設計されるので、中性子の減速体系を必要とする場合は、半径数十cmの球体状重量物になる可能性が高い。しかし、LDNSのレーザービーム輸送部は、電磁マグネットを使ったイオンビーム輸送系に比べ、はるかに軽量化でき、高い可動性も期待できるので、Fig. 1の②の様に、診たい部位へ中性子照射ができる位置へBeam-headを持って行き、そこへレーザーを供給できる可能性が高い。Beam-headの位置を変えながら、任意の方向へ中性子ビームを照射できるようにすれば、任意断面の断層撮影が可能になり、着目部位の実時間NRG撮影もできるようになる。

4. ib-DATAを使った高空間分解能One-side測定

前述の可動ヘッド型NRG装置を駆使して実部品内部の流体が撮影できたとしても、ラジオグラフィーの大きな欠点に直面する場合がある。Fig. 2は、PRG(Proton Radiography)で冷媒挙動を実時間撮影した映像の一コマであり、矢印(▽, △)で指した黒い部分が液冷媒の影である⁶⁾。下向きの矢印で示した液冷媒の塊や気泡の動きは非常に鮮明に捉えることができるが、上向きの矢印で示した一番下の流路では、全体が真っ黒で映像に動きが無くなり、流体の動きが全く分からない。このように、流路全体が流体で満たされ、気泡など、動きの目印となる物が無い場合、流体の動きが全く不明となり、ラジオグラフィーとは別の手法が必要となる。その一つがRI(Radio Isotope)の塊をトレーサーとして利用する方法であり、中でも、PNA(Pulsed Neutron Activation)⁷⁾とib-DATA(in-beam Double Activation Tracer Analysis)がLDNSの極短パルス中性子発生の特長を最も発揮できる手法と考えられる。共に、流体内部に中性子や陽子などの量子ビームを打ち込み、核反応により流体中に生成されるRIを測定に利用する。放射線検出器の配置により、Fig. 1の③に示すOne-side測定も可能となる。

ここで、PNAは、Fig. 3に示すように、流れの上流において流体にパルス中性子を打ち込み、下流のγ線検出器でRIからの崩壊γ線を検出した時刻から、RIの流動時間を測定する。そのため、PNAでは、定常状態の流れに対し、中性子照射位置と検出器の距離(L_0)、あるいは二つの検出器間隔(L_1)における平均流速が求まり、これら

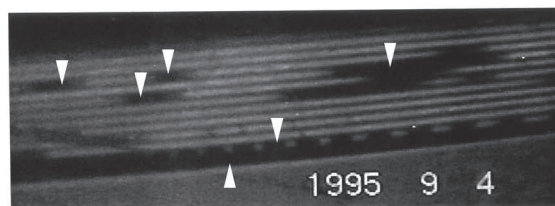


Fig. 2 Proton radiography image of boiling HFC134a in a tube.

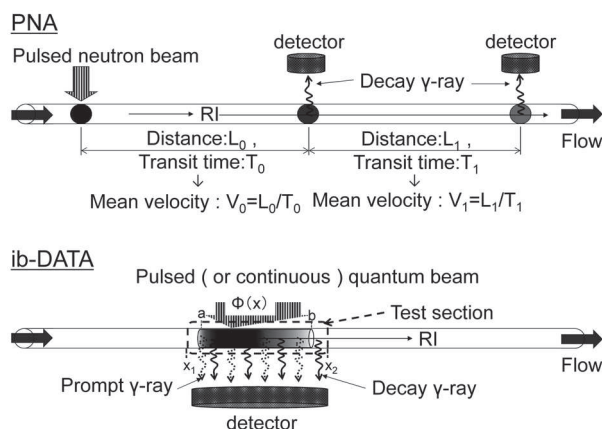


Fig. 3 Concept of PNA and ib-DATA.

の距離が測定の空間分解能となる。通常、数十cmから数m以上に及ぶため、車載用の小型機器への利用は限られる。

その点、ib-DATAでは空間分解能を数mmまで小さくできる可能性がある。ib-DATAでは、PNAのように上流から流れて来るRIを検出するのではなく、ビーム照射で生成するRIが流れに乗って流出する過程を調べる。そのため、ビーム照射領域を囲む若干大きめの領域で崩壊 γ 線測定を行う(この領域を、仮に、検査領域と呼ぶ：Fig. 3中のTest section)。その場合、 γ 線収量が減少しても、必要な測定精度が確保できれば、照射ビームを細く絞り、検査領域を長さ数mmまで小さくできるのである。さらに、Fig. 4の①に示すように、 γ 線コリメーターにより測定する崩壊 γ 線の発生領域を限定できれば、流速分布などをピンポイントで測定できる可能性がある(②～⑤についても同様)。また、長方形の平板状検査領域では、流動方向と検査領域のなす角度で崩壊 γ 線収量が変化するので、検査領域をFig. 4の③のように回転させれば、流動方向も検出できる可能性がある。さらに、④のように、様々な方向への流れが同時に現れる散逸の状況や、⑤のように空中へ吐出された流れも測定可能と考えられる。これらの測定において、流速などの測定値は検査領域内での平均値となるので、検査領域の大きさが測定の空間分解能となる。また、ib-DATAでは、ビーム照射に伴って検査領域で発生する即発 γ 線も測定する。RIの流出過程を追跡する場合、流出前のRI生成量の変動を正確に知る必要があり、RI生成量と同じく流体密度と比例関係にある即発 γ 線収量を使ってRI生成量の

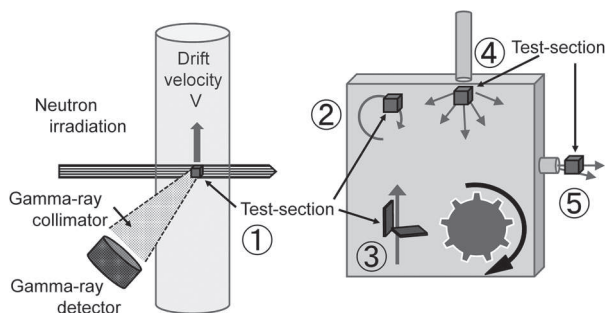


Fig. 4 Concept of 3D-pinpoint-ib-DATA and one-side measurement.

変動をモニターする。即発 γ 線の多くは、核反応後の 10^{-10} 秒以内の短時間に放出されるため、流速が数十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、流体密度の変動、すなわち、RI生成に関わる原子核数の増減を正確に反映すると考えられる。ib-DATAは、筆者が命名し、非破壊流体計測手法の一つとして開発中の技術である^{8,9)}。「in-beam」は検査領域へのビーム照射中にも γ 線計測を行うことを表し、即発 γ 線と崩壊 γ 線の二種類の γ 線を同時に計測することから「Double-Activation」を名称に入れた。量子ビームの照射方法には連続照射とパルス照射の2種類があり、流速などの測定原理が異なる。

量子ビームをパルス状に照射するPulsed-ib-DATAの測定原理をFig. 5に、模式的に示した。この手法では、まず、数ms以内のビーム照射時間で、流体内にRIの塊を作る。その時、照射開始から、検査領域での崩壊 γ 線収量の変化をリストモード測定で時系列に追跡し、崩壊と流出によりRIが減っていく過程を照射毎に調べる。照射毎の追跡時間の目安を、崩壊 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、RIに半減期が20.20 msの ^{12}B を利用する場合、図中の横軸(time)の最大値は概略150 msとなる。崩壊 γ 線収量の変化を縦軸($\ln(I_t)$)に対数で表すと、流れの無い場合は、半減期に対応した傾きを持つ直線となる(破線)。一方、流れが有る場合は、流速分布を反映した曲線(実線)となるので、この曲線の解析により流速分布が分かる。気液二相流であれば、スリップ比が測定できる可能性もある。さらに、検査領域の流出面の面積を確定できれば、流れの無い場合と有る場合の崩壊 γ 線収量の差から質量流量が分かる可能性がある。流速分布も精確に調べる場合は、ビーム照射時間(パルス幅)を極力短くし、なおかつ、大量のビームを照射する。その点、パルス時間幅の極めて短いLDNSは好都合であり、期待が大きい。

量子ビームを連続照射するContinuous-ib-DATAでは、一定して量子ビームの照射を続ける。この時、流体内では、核反応によるRIの生成と、崩壊と流出による減少が同時に起き、半減期と流量などで決まる一定量のRIが検査領域内に蓄積される。蓄積量は、ビームを浴びる時間が長いほど多くなるので、単位体積当たりの蓄積量で見れば、検査領域内でも下流ほど多くなり、検査領域全体で見れば、ビームを浴びる時間が長くなる遅い流れの方が多くなる。このRI蓄積量は、検査領域で実測する崩壊

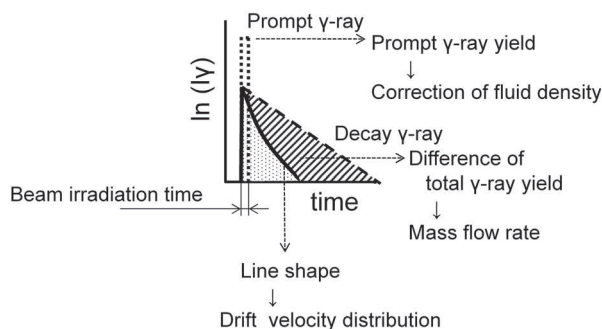


Fig. 5 Concept of analysis in pulsed-ib-DATA.

γ 線収量と比例関係にあるので、予め、流速と崩壊 γ 線収量(RI蓄積量)との検量線を作成しておけば、崩壊 γ 線収量の測定結果から流速が推定できる。Fig. 6に、Continuous-ib-DATAの検証実験⁹⁾で得られた検量データを示す。破線の曲線と共に示した測定点を滑らかに結ぶ曲線が検量線となる。この結果により、崩壊 γ 線収量(Decay γ -ray)が流速の増加と共に減少する現象が確認できた。即発 γ 線収量(Prompt γ -ray)は実験精度の範囲で一定である。この実験では、フラックス 1.6×10^8 n/cm²/sの熱中性子ビームを回転する粉末試料(Na₂CO₃)に連続照射し、核反応²³Na(n, γ)^{24m}Naにともなって放出される即発 γ 線(90.99 keV)と崩壊 γ 線(472.20 keV)を計測した。破線は、崩壊 γ 線収量の計算結果であり、Fig. 3のように中性子フラックス $\Phi(x)$ が検査領域中央部から少し上流側にピークを持つ分布をしており、照射領域から流出して $b \sim x_2$ の間を流動するRIからの寄与も考慮した時の結果⁹⁾である。計算により、検量線の形がフラックス分布 $\Phi(x)$ や γ 線検出効率 $\eta(x)$ に依存する様子が明らかとなった。これらを調整することにより、測定対象毎に曲線が設計でき、測定の高精度化を図ることができる。Continuous-ib-DATAは、予め検量線を作成する必要があるが、Fig. 4の②～④のように狭い空間内での流動現象や、RIの半減期が長いなど、一度流出したRIの一部が崩壊せずに検査領域に戻る場合にも使えるので、Pulsed-ib-DATAが使えない場合にも活用できる。

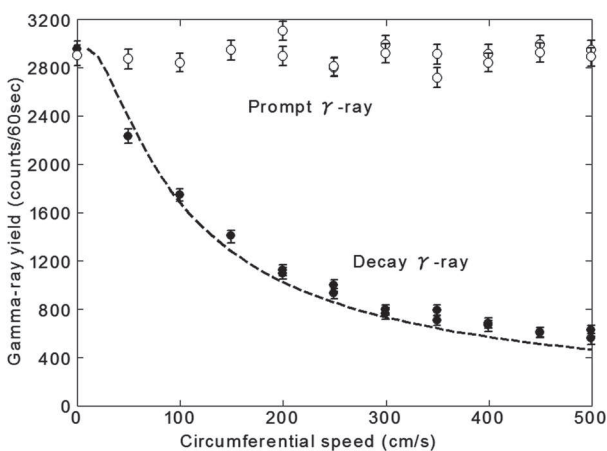


Fig. 6 Result in continuous-ib-DATA.

ここで、Table 1に、自動車業界で利用可能性の高い主な核反応を示す。Aが流体中の標的原子核、Bが生成RIである。¹²C(n, p)¹²Bは、燃料や潤滑油、射出成形の溶融樹脂など、炭素を含む有機材料の流体に利用できる。¹²Bは崩壊後の娘核が¹²Cとなり、¹²Cの励起準位からの γ 線(4.438 MeVと3.215 MeV)を崩壊 γ 線として検出する。しかし、これらは、入射粒子と¹²Cとの非弾性散乱による即発 γ 線としても発生し、エネルギーだけでは区別できない。この場合、Pulsed-ib-DATAを使って γ 線収量の時系列解析を行い、両者を γ 線の発生時刻(測定時刻)で区別する。崩壊 γ 線測定のス/N比を上げるには、パルス時間幅を小さくし、ビーム照射中に即発 γ 線と共に発生する崩壊 γ 線量を極力少なくする。パルス時間幅は1 ms以下が望ましいが、 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。S/N比向上においても、短時間に大量のビームが照射できるLDNSが大いに期待される。なお、¹²C(p, n)¹²Nでは、陽子線ビームにエネルギー変調を加えることにより、Fig. 4の③の平板状検査領域が実現できる⁹⁾。

¹⁶O(n, p)¹⁶Nは、冷却水などの流動解析に利用できるが、¹⁶Nの半減期が7.13 sと長いので、Fig. 4の②のように、滞留領域など、流速が1 cm/s以下の遅い場合や、¹⁶Nが崩壊せずに検査領域へ戻ってくる場合などで、Continuous-ib-DATAを使い、活用する。

²⁷Al(n, α)^{24m}Naや²⁴Mg(n, p)^{24m}Naは、生産現場におけるダイキャストの溶湯の流動解析に使える。ただし、崩壊 γ 線のエネルギーが比較的低いので、自己吸収による γ 線強度の減衰が大きく、機器表面から深い部位の測定は困難となる場合が考えられる。

Table 1の多くの反応で照射中性子のエネルギー(Ea)が10～20 MeVであるので、LDNSのBeam-headで使う高速中性子源として、²H(d, n)³He反応が有用と考えられる。この反応では、入射重陽子のエネルギーが10 MeVを超える辺りから、中性子エネルギーが10～20 MeVの範囲に入り、発生する高速中性子の大部分が前方に偏る¹¹⁾。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。LDNSに必要なパルス周波数は、利用するRIの追跡時間で決まり、

Table 1 List of main nuclear reactions used in ib-DATA.

Target (A) :natural abundance (%)	Main reaction			Radio Isotope (B)	
	A (a, b) B	σ (barn) ^{†3)}	Ea (MeV) ^{※)}	Half life (ms)	E γ (MeV) ^{※)}
¹² C:98.9	¹² C (n, p) ¹² B	0.01～0.026	16～20	20.20	3.215, 4.438
	¹² C (p, n) ¹² N	0.0035～0.004 ¹⁰⁾	20～30	11.00	3.215, 4.438
¹⁶ O:99.8	¹⁶ O (n, p) ¹⁶ N	0.01～0.16	11～28	7.13 (s)	6.13
¹⁹ F:100	¹⁹ F (n, α) ¹⁶ N	0.1～0.294	4.3～8.6		
²⁷ Al:100	²⁷ Al (n, α) ^{24m} Na	0.035～0.17	10～20	20.20	0.472
²⁴ Mg:78.6	²⁴ Mg (n, p) ^{24m} Na	0.08～0.3	10～20		
²³ Na:100	²³ Na (n, γ) ^{24m} Na	～0.528	thermal ^{※)}		

※) Ea: Incident quantum energy, E γ : Emitted γ -ray energy, thermal:thermal neutron

^{†3)} URL: <http://www.nndc.bnl.gov/sigma/index.jsp?as=204&lib=endfb7.1&nsib=10>

^{12}B や ^{24}Na の場合は約7 Hzまで上げることができる。周波数の上昇により、 γ 線収量が増加し、測定精度の向上が期待できる。また、中性子フラックスは、最低でも $10^{11} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ は必要と考えられる。例えば、数十cm/sで流動する潤滑油を $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{p})^{12}\text{B}$ 反応を使って測定し、Fig. 6と同等の約2000カウントの γ 線収量を得ようとする場合、反応断面積が $^{23}\text{Na}(\text{n}, \gamma)^{24}\text{Na}$ 反応のほぼ1/50 (Table 1)であるため、単純に $1.6 \times 10^8 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ の50倍として、約 $10^{10} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ のフラックスが必要となる。さらに、 ^{12}B の崩壊 γ 線エネルギーが3 MeV以上と高く、 γ 線検出器の検出効率が低下する上、測定時間を6 sより短くする必要のある場合を考慮すると、最低でも $10^{11} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ のフラックスが必要となる。この値は、前述の撮像周波数連続可変型NRG装置より3桁大きい。照射ビームにNRGのような高い平行性を必要としないので、Beam-headを測定部位に近づけることができ、技術の実現可能性は高いと考えられる。Fig. 1の③に示す高空間分解能One-side測定への期待は大きく、その大きさからCT撮影の困難な、エンジンやミッション、デフギアなどの測定で、その実現が切望されている。これらの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 (Computer Aided Engineering)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点で良いので、高空間分解能One-side測定による実働実機での流体計測が望まれている。

5. 今後の展望

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¹²⁾、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¹³⁾、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。そのためには、上記の可動ヘッド型NRG装置や高空間分解能One-side測定装置を使ったField Inspectionへの広がり期待したい。なお、その場合、レーザー発生部は、最大限でも、2 tトラックで運べる大きさに小型化する必要がある。

また、レーザー駆動粒子線加速を利用するLDNSでは、前述の陽子線の他、電子線やその制動X線もib-DATAに利用できる。ib-DATAの測定原理は、測定対象とする現象の変化が停止状態で近似できる短時間の緩和過程(即発 γ 線放出など)と現象の変化がその測定に顕著な影響を及ぼす緩和過程(崩壊 γ 線放出など)の少なくとも二つの緩和過程が存在すれば、RIが使えない場合にも適用できる。極短パルスのレーザー励起による遅延蛍光や燐光など、LDNS周辺への期待も非常に大きい。

参考文献

- 1) 米田 政夫, 山本 和喜, 八木 理公, 佐川 尚司: JAEA-Technology (2008) 2008-064.
- 2) IFEフォーラム, 大阪大学レーザーエネルギー研究センター, 光産業創成大学院大学: レーザー中性子源による新産業創成調査研究委員会報告書 (2010) 38.
- 3) 林 眞琴: 非破壊検査 **60** (2011) 65.
- 4) 加美山 隆: 平成16年度～平成17年度科学研究費補助金「基盤研究(C)(2)」研究成果報告書 研究課題番号16560622.
- 5) 川端 祐司: RADIOISOTOPES **57** (2008) 267.
- 6) 掛布 光孝: RADIOISOTOPES **47** (1998) 281.
- 7) P. Kehler: Proc. of the USNRC Review Group Conference on Advanced Instrumentation for Reactor Safety Research, (1980) NUREG/CP-0015.
- 8) 国内公開特許公報: 2014年, 特開2014-52205.
- 9) 掛布 光孝: 日本機械学会論文集: 投稿中.
- 10) K. H. Hellwege: Nuclear and Particle Physics 5B; Q-Values and Excitation Functions of Nuclear Reactions (LANDOLT-BORN-STEIN NEW SERIES, I-5B) (1973) p. 162.
- 11) C. L. Ellison and J. Fuchs: Phys. Plasmas **17** (2010) 113105.
- 12) 掛布 光孝, 川本 淳一: 自動車技術 **41** (1987) 1364.
- 13) 理化学研究所: 小型中性子イメージングシステム検討委員会報告 (2010).

レーザーワード

崩壊 γ 線と即発 γ 線(decay γ -ray and prompt γ -ray)

γ 線は、高いエネルギー状態にある原子核が、より低いエネルギー状態へ遷移する際に放出する電磁波の一種であり、軌道電子の遷移に起因するX線と発生機構で区別される。高エネルギー状態の原子核は、非弾性散乱を含む様々な核反応により生成され、多くの場合、高エネルギー状態の寿命は 10^{-10} 秒以下と短い。このような短時間の間に原子核から放出される γ 線を即発 γ 線と呼んでいる。一方、崩壊 γ 線は、放射性同位元素の原子核の崩

壊に伴って発生する γ 線を指している。 α 線や β 線などを放出する原子核の崩壊では、数ミリ秒から数万年以上の長い半減期を経て、別の原子核(娘核と呼ぶ)へ変化するが、その時、各崩壊過程に固有の割合で高エネルギー状態の娘核が現れ、やはり、多くが 10^{-10} 秒以下の短時間に γ 線を放出して、より安定な状態に遷移するのである。ちなみに、寿命を $0.693 (= \ln 2)$ 倍すると半減期になる。(掛布 光孝)