

付録3 用語解説

(1) RF-ECT (リモートフィールド渦電流探傷法 Remote-field Eddy Current Testing)

FBR プラント工学研究センター 副センター長 仲井 悟

① 渦電流探傷試験 (ECT) の原理

ECT とは、コイルに電流を流したときの磁場によって金属内部に発生した渦電流が、傷などにより乱れることを利用して、傷を検知する試験方法である。コイルに交流電流を流し、測定物(導体)に近づけると、測定物には渦電流(同心円状の電流)が発生する。下図のように、検査物に傷がある場合と無い場合では、渦電流の流れが異なります。渦流探傷試験では、この渦電流の流れの差異を元に、傷を検出する。

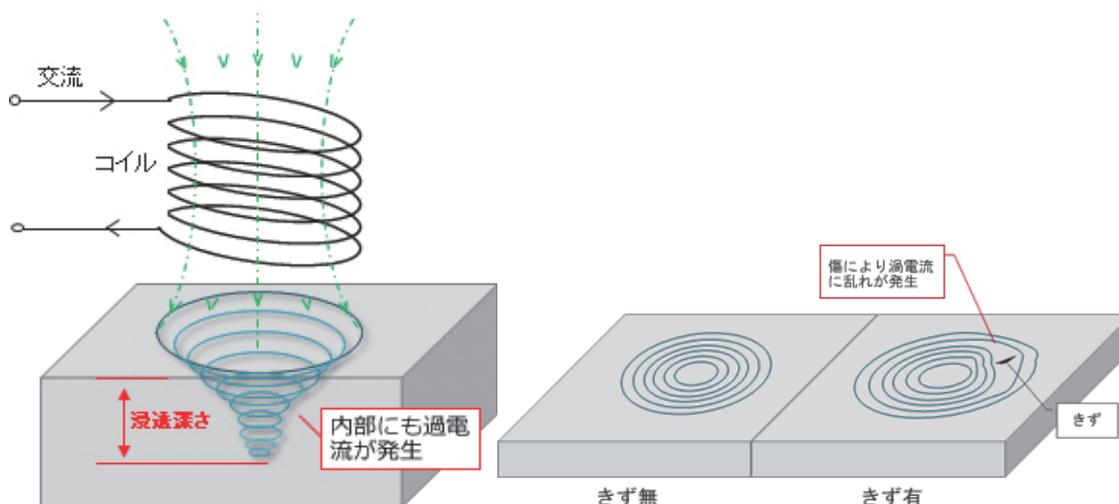


Fig. 1 渦電流探傷試験 (ECT) の原理

② コイルの種類

渦電流探傷試験は、渦電流探傷器にコイル(プローブ)を接続して行う。コイルには以下の3種類がある。

- 内挿コイル
- 貫通コイル
- 上置コイル

内挿コイルは、配管やパイプに挿入して探傷を行う。熱交換器などの保守検査で広く適用されている。

貫通コイルは、ワイヤーや棒、配管・パイプの探傷に使用され、内挿コイルとは逆に、コイルの内側に試験体を通して探傷を行う。

上置コイルは、上記2種類のコイルに比べ、より微小な欠陥を検知することができる。微細な傷の検出や、平板状の試験体の探傷に使用されている。

③ リモートフィールド渦電流探傷試験 (RF-ECT)

ECTは、電磁誘導作用によって発生する渦電流の変化から「きず」を探傷する検査技術で、通常は銅、チタン、アルミ等非磁性管のみを対象としているが、RF-ECTは、炭素鋼、フェライト系鋼等の磁性材料で、間接磁場より信号を受信する技術である。

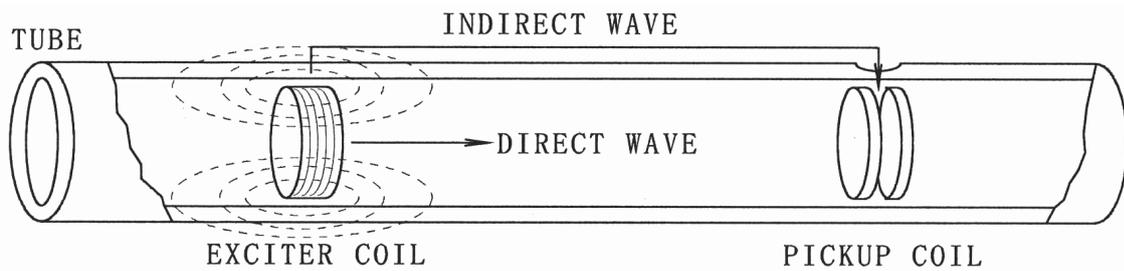


Fig. 2 RF-ECT の探傷概念図

RF-ECTでは、励磁コイル (Exciter Coil) と検出コイル (Pickup Coil) の2種類のコイルを1組としたプローブを管軸に平行移動させて欠陥探傷を行う。Fig. 2 の概念図で示すように、励磁コイルに交流電流を流すと、管壁内に渦電流が流れる。この渦電流により生じる磁場を間接誘導磁場と呼び、この間接誘導磁場成分が支配的になる領域をリモートフィールド領域と呼ばれている。

管に流れる渦電流からの磁場を検出するため、管に傷が存在した時、渦電流が乱れ同時に磁場も乱れる。この磁場の乱れにより欠陥の確認と位置を同定するのがリモートフィールド探傷法である。

数 kHz といった低周波数で探傷が行なわれるというのが RF-ECT の特徴でもある。低い周波数を用いると管壁の奥まで磁場が伝播することができ、それによって管の内側にある欠陥も外側にある欠陥も同程度に検出することができる。また、超音波など MHz の周波数帯を用いて探傷を行なう場合はリフトオフ (管とプローブとの距離) が問題になるが、RF-ECT では低い周波数帯を用いていることでリフトオフが欠陥検出信号に与える影響も少ないといったメリットがある。

(2) MA 燃焼の仕組み

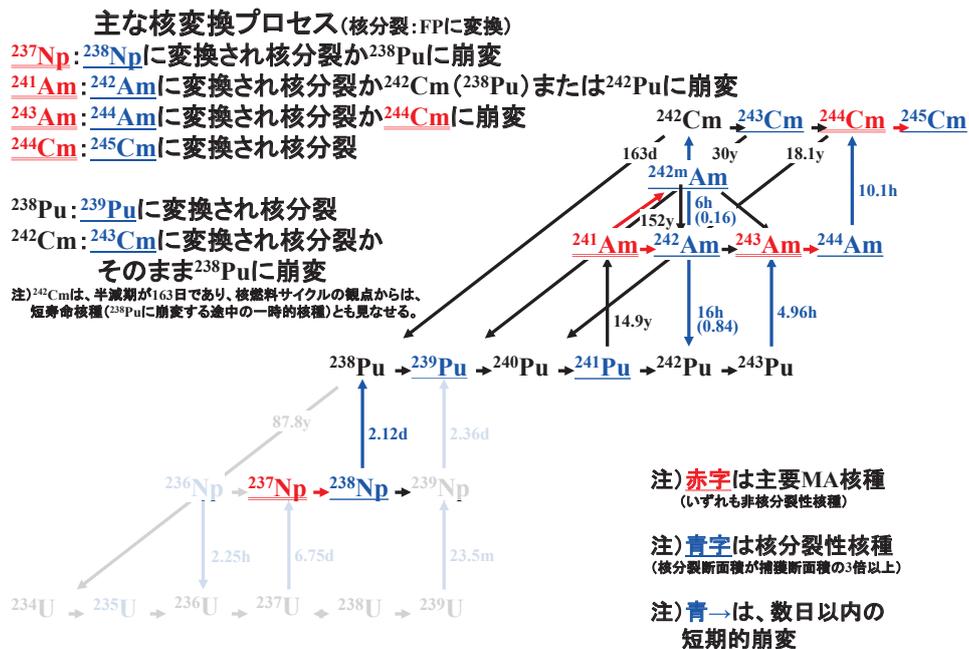
FBR プラント工学研究センター 研究主幹 西 裕士

原子炉内でウラン燃料（主として ^{235}U ）が燃焼（核分裂反応）すると、同時に装荷されている燃えないウラン（ ^{238}U ）が中性子を捕獲して、プルトニウム（ ^{239}Pu ）が生成される。その結果、使用済み燃料中には、プルトニウムが蓄積される。ただし、同時に ^{238}U の (n, 2n) 反応（中性子を1個吸収して2個放出する反応）や、生成された ^{239}Pu の中性子捕獲反応の繰り返し等により、 ^{240}Pu 、 ^{241}Pu 等の高次化 Pu だけでなく、ネプツニウム（ ^{237}Np ）、アメリシウム（ ^{241}Am 、 ^{243}Am ）、キュリウム（ ^{242}Cm 、 ^{244}Cm ）等の微量元素も併行して生成・蓄積されて行く。

これらの元素は、その生成・蓄積量が微量（軽水炉使用済み燃料では、Pu 蓄積量の 1/10 程度）であることから、アクチニウム系列元素（アクチニド | 原子番号 89 番のアクチニウム：Ac から始まる一連の重核種元素。原子番号 92 番の U や 94 番の Pu が代表的で「メジャー」）の内でも、特に「マイナー」アクチニドと呼ばれる（原子番号は Np が 93 番、Am は 95 番、Cm は 96 番）。

これらマイナー・アクチニド（MA: Minor Actinide）は、現行の再処理方式では、核分裂生成物（FP: Fission Products）と同様に放射性廃棄物として扱われる。ただし、半減期の長いものが多く（ ^{237}Np : 2.14 百万年、 ^{241}Am : 432 年、 ^{243}Am : 7.37 千年、 ^{244}Cm : 18.1 年）、放射性毒性が比較的長く残る（代表的 FP 核種の半減期は ^{90}Sr : 28.8 年、 ^{137}Cs : 30.0 年）。よって、これを高速炉炉心内に装荷して、核分裂により短半減期核種（FP）に核変換する事が考えられている。これを一般には「MA 燃焼」と呼び、放射性廃棄物を核燃料親物質として回収・再利用する事にも相当する。

事実、これら MA 核種は、いわゆる偶奇核（原子番号と質量数が偶数と奇数の組合せになっている核種）ではなく、いずれも非核分裂性核種である。したがって、実際の炉内では ^{238}U 等と同様に、一部は高速中性子により直接核分裂するが、大半は先ず中性子捕獲により核分裂性核種に核変換され、その上で核分裂により FP に変換される。詳細を以下に図示する。当然新たな MA の生成もあるが、初期装荷量が多ければ差引では消滅する。これが「MA 燃焼の仕組み」である。



主要MA核種の核変換(燃焼)プロセス

出典) オーム社「原子ハンドブック」および
 高速炉用ORIGEN2断面種ライブラリ(JENDL3.3)

アルファベット順

EVST(Ex-Vessel fuel Strage Tank、炉外燃料貯蔵槽):新燃料及び使用済燃料の中継貯蔵を行う貯蔵容器、遮へいプラグ、回転ラックなどから構成される設備。炉心内で所定の燃焼期間を経た使用済燃料を炉心から取り出す際に、使用済燃料から発生する崩壊熱が十分低下するまで、一定期間ナトリウム中で貯蔵できる冷却系統設備を有する。

FP(Fission Products、核分裂生成物):原子力発電における燃料のウランなどの核分裂によってできた核種、またはそのような核種(核分裂片)から放射性の崩壊によってできた核種をいう。核分裂に伴う生成核種の主要なものとしては、セシウムCs-137、ストロンチウムSr-90 などがある。核分裂生成物は、使用済燃料の再処理工程で、高レベル放射性廃棄物の放射線と崩壊熱の発生の主要な原因となる物質の総称である。

ISI(In-Service Inspection、供用期間中検査):原子力発電所など原子力施設は、安全性を重視するため、通常の運転休止期間中に非破壊検査を実施し、機器に要求される安全上の機能の確認を行っている。このような検査をISIとよんでいる。例えば、原子炉容器など高放射線領域の検査のため、遠隔操作が可能な自動超音波探傷装置などを用いた検査の事をいう。

JENDL (Japanese Evaluated Nuclear Data Library): 日本原子力開発機構 核データ評価研究グループ(旧 日本原子力研究所・核データセンター)が日本国内の核データ関係者の協力を得て、原子炉核計算などで必要となる多くの核種の核データの推奨値をまとめ、世界共通のフォーマットでファイル化したもの。アメリカの ENDF、欧州の JEFF 等とともに代表的な核データライブラリとなっている。

MA (Minor Actinide、マイナーアクチニド): 周期律表において原子番号 89 のアクチニウムから 103 のローレンシウムに至る 15 の元素を総称してアクチノイド元素といい、このうちアクチニウムを除いたものをアクチニド元素という。高速増殖炉使用済燃料の主要成分である U、Pu に比べ存在量の少ない Np、Am、及び Cm 等のその他のアクチニドをマイナーアクチニド(MA)という。

RF-ECT(Remote-Field Eddy Current Testing):強磁性体の欠陥検査には材料の持つ磁気特性の不均一を原因とする雑音のため通常の渦流探傷法(ECT)の適用が困難だったことから、間接磁場を利用して、配管や容器などの傷の有無を検査する(探傷)方法の一つである。

SG (Steam Generator、蒸気発生器):タービンを駆動するために蒸気を発生させるための熱交換器。軽水炉の PWR では、原子炉 1 次冷却材と水/蒸気側で熱交換させているが、ナトリウム冷却高速増殖炉では、放射化されていない 2 次冷却材ナトリウムと、水/蒸気側で熱交換させている。

Super-COPD: プラント動特性解析コード:(機器・配管等の解析対象を 1 次元で各々モデル化し、系統構成に組合せて計算)

五十音順

アクチノイド: 原子番号 89 のアクチニウムから 103 のローレンシウムに至るアクチノイドのうち、原子番号 89 のアクチニウム(Ac)を除く、原子番号 90 から 103 までの 14 元素 Th、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr の総称である。アクチニウムに類似しているという意味でこのように言われる。

確率論的安全評価(PSA : Probabilistic Safety Assessment): 確率論的安全評価とは、発生する可能性のあるさまざまな事象に対して、その発生の確率を考慮して安全性を評価することである。原子炉の場合、原子力施設等で発生し得るあらゆる事故を対象として、その発生頻度と発生時の影響を定量評価し、その積である「リスク(危険度)」がどれ程小さいかで安全性の度合いを表現する。なお、PSA と対比される決定論的安全評価では、ある事故は起きるものとして、その時のプラントや環境に対する影響を定量評価し、それが一定基準以下であれば、その事故に対して安全性が確保されていると判断する。PSA は、施設・設備の劣化を考慮に入れた安全評価として、海外では、広範に利用されている。

カバーガス: 容器に入った液体が空気に触れて反応することを防ぐ目的で、液面上部に充填する気体をいう。例えば、ナトリウム冷却の高速炉では、液体ナトリウムが活性なので原子炉容器の上部には不活性気体のアルゴンガスを充填する。また、研究炉ではヘリウムが使われている。ただし、カバーガスは不活性気体(希ガス)である必要はなく、原子炉以外では窒素ガスが用いられることもある。原子炉では、窒素が中性子を吸収して半減期が長い放射性の ^{14}C ができるので、カバーガスに窒素を用いることは適当でない。

コールドトラップ(cold trap): 一般には、真空ポンプを用いたシステムにおいて真空ポンプを保護する目的で、水蒸気等の気体を減圧・冷却して液体または固体の形で除去する装置をいう。原子力分野では、高速炉の冷却材ナトリウム中の不純物を除去する精製装置の一種として用いられ、CT とも呼ばれる。不純物(普通は酸化ナトリウム)の溶解度が低温で小さくなる性質を利用して、ナトリウム中の酸素、水素、炭素などの不純物を低温下で多様な化合物(反応生成物)の形で析出させ、分離・回収する。一次系のコールドトラップは、核分裂生成物や放射化された不純物も反応生成物として析出させ、それを分離・回収する。

トリチウム(tritium): 水素の同位体で、原子核が陽子 1 個と中性子 2 個からなる核種。日本語では三重水素と呼ばれ、 ^3H または T と表記される。半減期 12.3 年の放射性同位体で、18.6keV の β 線を放出する。宇宙線による核反応で生成するが、天然にはごく微量にしか存在しない。人工的には原子炉燃料内で生成し、使用済燃料の再処理時に放出される。核融合炉の燃料の一つであるが、天然には得られないので、親物質のリチウム 6 を中性子照射して製造する。ただ、水素の同位体であるので水素と同様な性質を有しており、工学的には金属中の透過(閉じ込めの困難さ)や金属材料の水素脆化が問題となる。

ブランケット(blanket): 核分裂性物質に転換する目的で、炉心内もしくはその周囲に配置される親物質をいう。プルトニウムを利用する高速増殖炉では、親物質であるウラン 238 をブランケット材とし、燃料ピンの上下端部に配置(軸方向ブランケット)する場合や、炉心の外周部にブランケット材だけで集合体(ブランケット集合体)を作って配置(径方向ブランケット)する設計例が多い。ブランケット集合体を、炉心内部に、燃料集合体と交互に配置する炉心設計を、非均質炉心という。

崩壊熱除去: 原子炉では核分裂連鎖反応によりエネルギーを発生するとともに、核分裂生成物が生成される。この核分裂生成物は放射性物質であり、核崩壊により放射線を放出しながら熱を発生する。このため原子炉の炉心は、炉停止後も核分裂生成物の崩壊により、持続して熱が発生する。これを崩壊熱

といい、その発生量は、原子炉停止直後では、定格出力の約 7%に相当する。その後、核分裂生成物の崩壊に伴って崩壊熱の発生量は減少する。したがって原子炉は運転停止後もこの崩壊熱を除去する必要があり、この目的のための冷却系を崩壊熱除去系(余熱除去系)と呼ぶ。

崩壊熱除去機能喪失(PLOHS、Protected Loss of Heat Sink):制御棒が既に炉心に挿入された状態での、空気冷却器等の崩壊熱の除去機能を喪失すること。