

SFRの供用中検査及び修理、 第4世代の別システムへの拡張

概要 / 目的:

第4世代原子炉の安全を考慮する上で、供用中検査は非常に大きな課題です。そのため、フランスでは2010年からSFRの原子炉構造、一次系の機器及び系統、熱交換器などの主要機器の検査に関する研究開発を進めています。供用中の検査要件は、**初期の概念設計段階から検討を開始**します。その後の基礎設計段階で、詳細仕様を検討し、**約200°C(シャットダウン時)のナトリウムに浸漬環境における構造物用の検査機器の仕様**を確定します。原子炉容器内の検査は、ロボットに取り付けられたトランスデューサをナトリウム中で使用し行います(ナトリウム環境外のものもある)。**超音波トランスデューサを用いた非破壊検査、遠隔測定、画像化**の性能は、**水中試験及びナトリウム中試験**により確認し、その後、フランスで開発されたソフトウェアCIVAを使ったシミュレーション結果と試験結果を比較します。ISI&Rプログラムでは、補修についてもレーザを用いた補修システムの開発を行いました。本セミナーではISI&Rプログラムの技術的な概要と、主にGen-IVで行われた国際協力をご紹介します。もちろんSFR以外の第4世代システムにも有益な情報です。

講演者紹介:

Dr. François Baqué博士は、CEA Cadarache IRESNEの原子力技術部門で、高速炉の検査に関するシニアエキスパートを務めている。

以前は、CEAの**ASTRIDプロジェクトのIn Service Inspection and Repair**に関連するR&D活動のマネージャーを務めていた(2010年~2019年)。この間、**超音波センサーや電磁センサー、**

関連する検査方法の開発や適格性評価に携わるCEAの組織を率いていた。フランスの大学や国立科学研究センターで、超音波法に関する博士論文を指導している。また、検査システムおよび検査方法に関するGen-IV/SFR-CD&BOP(コンポーネント・デザインおよびバランス・オブ・プラント)グループにも積極的に参加している。



1. ナトリウム冷却高速炉のための検査技術の開発

液体ナトリウムは不透明で、ドレンを行うことも容易ではありません。しかし、**超音波計測法を用いれば、液体ナトリウム中で検査を行うことができる。**

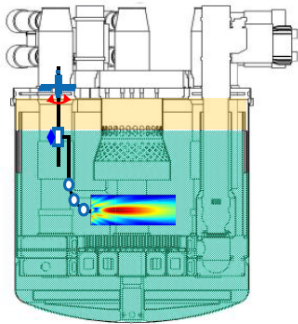
フランスでは、NDEのための3つのR&Dプログラムを実施しています。1) 原子炉内の特定のターゲットに対する**遠隔距離測定**、2) **ルースパーツや開口クラックの画像化**、燃料要素の識別、炉内操作装置の**位置決め**、3) **溶接部の体積検査**。

GEN IV International Forum

Developments of Examination and Inspection Techniques for SFRs

Inspection mainly with ultrasonic means:

- Liquid sodium is opaque, not easy to drain.
- Ultrasonic metrology chosen as key technology to render feedback for in sodium inspection: *Propagation, Damping, Reflection and Diffraction of Ultrasonic Waves*



Acoustic techniques:

- Low attenuation by the sodium medium
- High velocity of US wave ($\approx 2400 \text{ m.s}^{-1}$ at 200°C)

French R&D Program for ASTRID Non Destructive Examination:

- *Telemetry* of specific targets in the reactor block
- *Imaging* of local and general areas, of lost parts, of opened cracks, identification of fuel elements, positioning for robotics
- *Volumetric control* of immersed structure welded joints

GEN IV International Forum
Expertise | Collaboration | Excellence

10

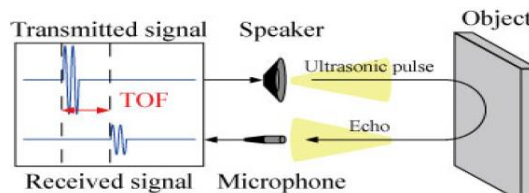
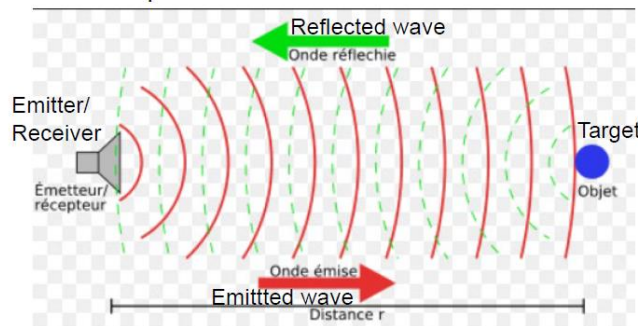
2. 超音波による計測の原理

送信波及び対象からの反射波を用いた超音波による計測

GEN IV International Forum

Developments of Examination and Inspection Techniques for SFRs

Principle for ultrasonic measurement



Distance =

$$\frac{\text{Wave speed in the media (m/s)} \times \text{Time of flight (s)}}{2}$$

(outward & return)

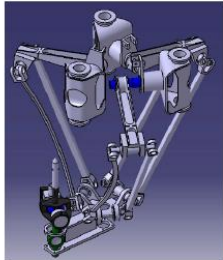
GEN IV International Forum
Expertise | Collaboration | Excellence

12

3. ナトリウム中における超音波による可視化/画像化

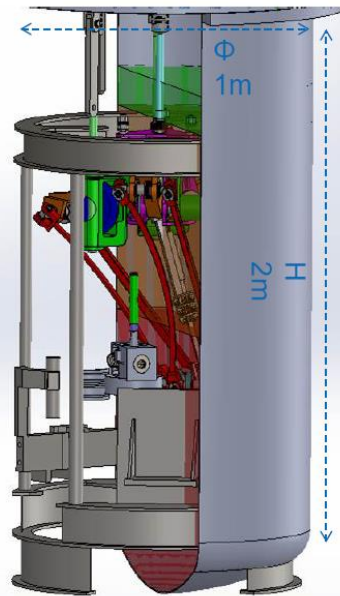
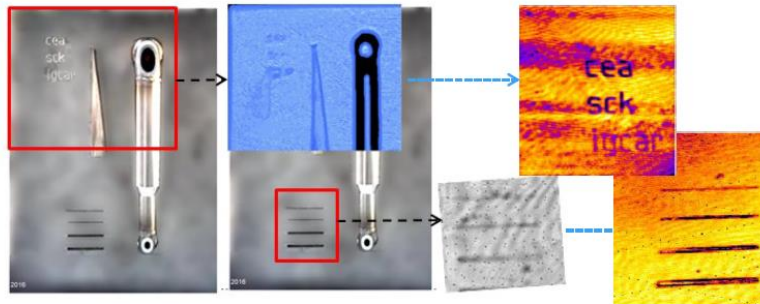
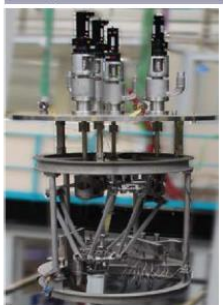
温度200°Cのナトリウム環境下での超音波による可視化の試験結果を示す。
(対象とセンサ間の距離が20cm以下のケース)

Under Sodium Near Distance Imaging



Qualification in 200°C sodium with VENUS facility at 200°C:

- With 3D robot
- With TUSHT^{CEA} sensor (flat and focused front face)



4. 非破壊検査のためのナトリウム中画像化試験(溶接部にも有効)

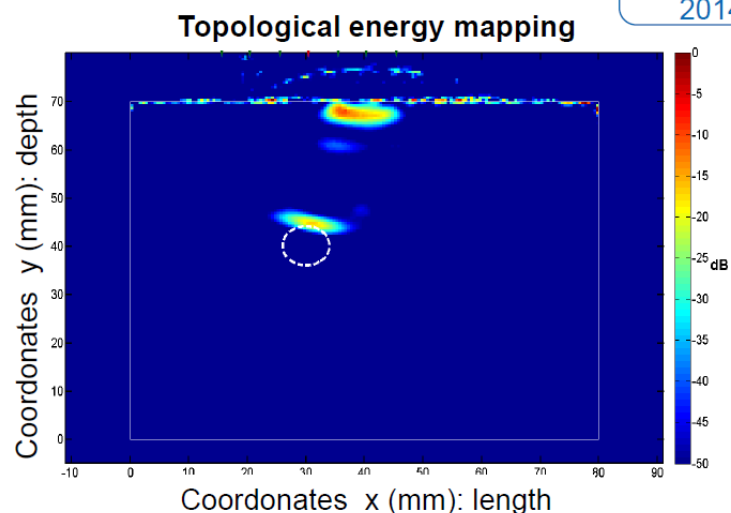
- A. アコースティックフィールドの設定
- B. タイムリバーズ法による欠陥位置の絞り込み
- C. トポロジカル・エネルギーに基づく画像化

Under Sodium Imaging for Non Destructive Examination

Heterogeneous medium: differential method

A 3 step-process:

1. Extracting acoustic field due to the perturbation. This step consists in **making the difference** between a reference medium and the inspected one.
2. Focusing on defect location using **time-reversal** techniques.
3. Imaging while computing the time-gated **topological energy**.



$$ET(x) = \int_{\frac{d(x)-\Delta t}{c}}^{\frac{d(x)+\Delta t}{c}} \|u_0(x, t)\|^2 \|v_{rt}(x, T-t)\|^2 dt$$

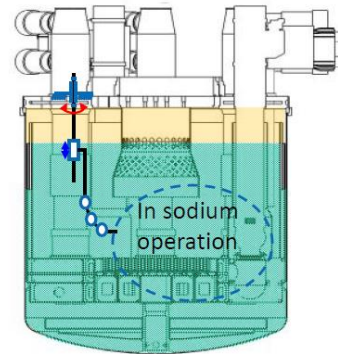
5. ナトリウム環境用ロボット技術

検査のためのツールとしても重要となるロボット技術の概要および具体例として2自由度を有するロボットのモックアップ等の開発事例を示す。

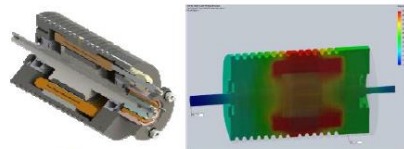
GEN IV International Forum

In-sodium Robotics

- ❑ Generic studies on robotics (in sodium or not);
- ❑ Associated means for testing (air/water/sodium);
- ❑ Case 1: main vessel inspection with robot in the gap between main and safety vessels (out of sodium);
- ❑ Case 2: sensor for steam generator tubes;
- ❑ Case 3: in sodium pushed chain type robot;
- ❑ Case 4: in sodium pole and cable type robot;
- ❑ Case 5: on-wheels robot for large in-gaz equipments;
- ❑ Case 6: robot for repair tools;



GEN IV International Forum
Expertise | Collaboration | Excellence



Prototypic brushless motor
working at 200°C



Specific tight robot mockup
with 2 degrees of freedom

39

6. 結論と展望

超音波トランスデューサの開発、非破壊検査技術の検証、ロボット技術の進展はナトリウム冷却高速炉や他の第四世代炉のための供用中検査・保守技術として主要開発項目となるものである。

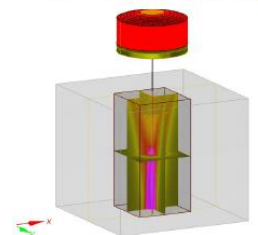
Conclusions and Perspectives

The R&D program launched by France for Inspection & Repair of Sodium Fast Reactors is on the way for technical demonstration capabilities in this harsh environment. It has been strongly linked to ASTRID prototype design, from 2010 to 2019.

Development of ultrasonic transducers for telemetry, imaging, Non Destructive Examination: piezoelectric and electromagnetic concepts for operation at about 200°C in liquid sodium



Development and qualification of Non Destructive Examination techniques: extensive simulation with CIVA software platform and experimental testing (under water and under sodium)



Development of robotics for large reactor vessel: generic studies for associated materials and specific concepts



GEN IV International Forum
Expertise | Collaboration | Excellence

46