

## 京都大学研究用原子炉 (KUR) 計測制御系統施設の保守管理

複合原子力科学研究所 中森 輝

### 1. はじめに

大阪府熊取町に位置する京都大学複合原子力科学研究所（2018 年までは京都大学原子炉実験所）の研究用原子炉（Kyoto University Research Reactor。以下、“KUR”という。）は定格出力 5,000kW、法的には“試験研究用等原子炉”と呼ばれるものであり、1963 年の設立および翌年の初臨界以来、原子炉運転時に放出される中性子を用いた一般研究、材料照射、放射性同位元素生産、開発研究、医療照射及び教育訓練のために利用されている。

原子炉施設は原子炉本体、冷却系統施設、計測制御系統施設等到大別されるが、それぞれの施設、設備は機能や構造について原子力規制委員会へ申請した上で承認を受けており、法令上の技術基準を満足するよう計画的な保守管理を行うと共に年に一度全体的な定期検査を受ける必要がある。

本講義では特に計測制御系統施設について、その概要や保守管理、経験したトラブルなどについて紹介する。



写真 1. 複合原子力科学研究所 原子炉棟航空写真

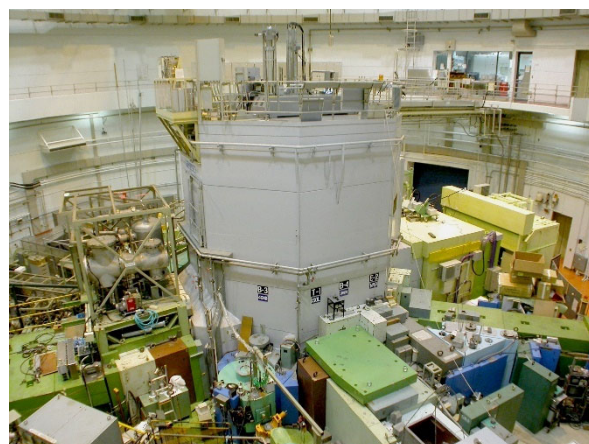


写真 2. 炉室内

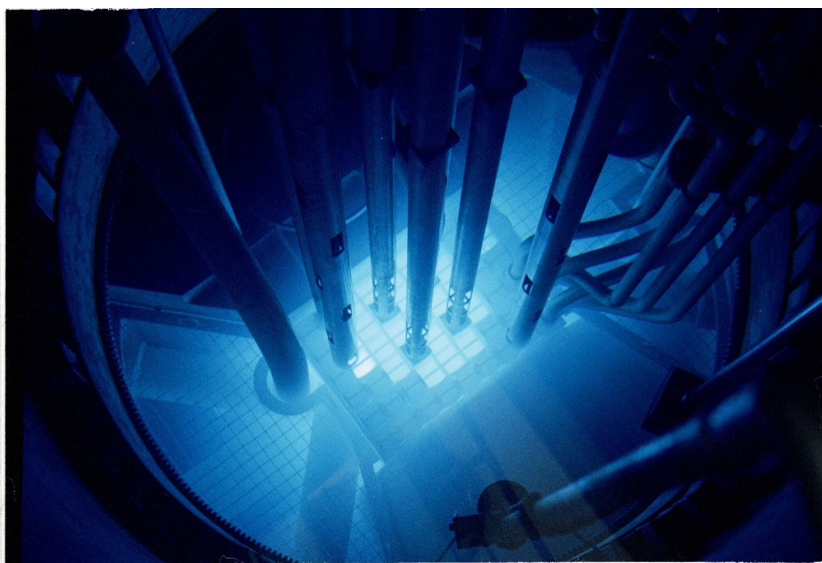


写真 3. KUR のチェレンコフ光

## 2. 計測制御系統施設とは

KURの原子炉施設は原子力規制委員会へ申請する上で“原子炉本体”、“核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設”、“原子炉冷却系統施設”、“計測制御系統施設”、“放射性廃棄物の廃棄施設”、“放射線管理施設”、“原子炉格納施設”、“その他原子炉の附属施設”に分けられている。原子炉室の空調設備や排水を処理する施設、試料を操作して原子炉からの放射線を照射するための実験設備等も、規則上はこれら原子炉施設に含まれる。

これらのうち、計測制御系統施設は原子炉に関する各種パラメータを計測する計装系設備や、原子炉出力を制御するための制御系設備を含む設備群である。以下に各設備の概略を示す。

### ・核計装

核分裂計数管や電離箱によって原子炉から放出される中性子を検出し、中性子の計数率（単位：count per second）や原子炉の出力（単位：W）を制御室に表示する。KURには用途や表示形式の違う6系統の核計装が設けられている。

### ・プロセス計装

原子炉が入った炉心タンクや冷却系配管等に取り付けられ、水位、温度、圧力、導電率等を測定して制御室に表示する。申請上は“原子炉本体プロセス計測装置”、“冷却系統用プロセス計測装置”という名称で説明されているが、まとめて「プロセス計装」と呼んでいる。また、同種のパラメータを測定する申請対象外の機器も多数存在する。

### ・その他の計装機器

事故が発生した際には炉室の空気や原子炉冷却水の中に放射性物質が漏れだす可能性があるため、それらを検知するための放射線モニタが各所に設置されている。そのほかに炉室内外の気圧差を測定することで炉室の気密状態を監視する炉室差圧計や、地震を検知するための地震計等がある。



写真 4. 制御室 制御卓



写真 5. 制御室 警報表示等

### ・制御設備

KURの炉心は、ウランを含む燃料要素、燃料要素の周囲に配置され燃料要素からの中性子を炉心の内側に反射する反射体要素、内部が中空になっており冷却水で満たされたプラグ要素などから構成される。原子炉の運転に使用する制御棒は中性子を吸収しやすいホウ素をステンレスに混ぜたボロンステンレス鋼でできており、制御室から操作する駆動装置によって燃料要素群の中に上から挿入することでウランの核分裂連鎖反応を阻害し、原子炉を停止させることができる。逆にこれらを引き抜くことで原子炉を起動（または出力を上昇）させることができる。制御棒には効果の強い粗調整用制御棒4本（A、B、C、D rod）と、中空構造の微調整用制御棒1本（R rod）がある。

非常時の原子炉停止手段として、ホウ酸の粉末約 70 kg が中性子吸収剤として用意されている。非常時に制御棒が何らかの原因で動作しなくなった場合は炉心タンク上部からこのホウ酸を投入することで原子炉を停止することが出来る。

- ・安全保護回路

計装機器の指示値が異常値を示した際には、信号の種類やその値に応じた安全保護回路が作動する。異常発生時の動作として、安全性に影響を与える恐れがある異常を検知した際にブザーとランプで知らせる“警報”や、原子炉の出力を下げる必要があるときに粗調整用制御棒 4 本を自動的に挿入する“一せい挿入”、原子炉を緊急停止する必要があるときに粗調整用制御棒 4 本を自由落下させる“スクラム”、原子炉の起動（または出力上昇）が妥当ではない状況下で制御棒の引き抜き動作にロックがかかる“起動インターロック”が設けられている。



写真 6. 炉頂 制御棒駆動装置



写真 7. ホウ酸

### 3. 計測制御系統施設の保守にかかる定例業務

KUR の原子炉施設は複合研で定める施設管理実施計画に基づいて管理されており、計測制御系統施設の多くは年 1 回の定期点検を行っている。

核計装、プロセス計装をはじめとしてメーカーや保守業者に保守を依頼する機器がほとんどであるが、一部の装置は複合研職員が分解整備を行っている。

保守担当部室（KUR の場合は研究炉部）による保守や点検が終わった後、複合研職員で構成される検査小委員会による定期事業者検査が実施される。定期事業者検査では各設備について法令に定める技術基準を満たしているかどうかの確認が行われ、定期事業者検査に合格することでその後また 1 年間 KUR を運転することが出来るようになる。

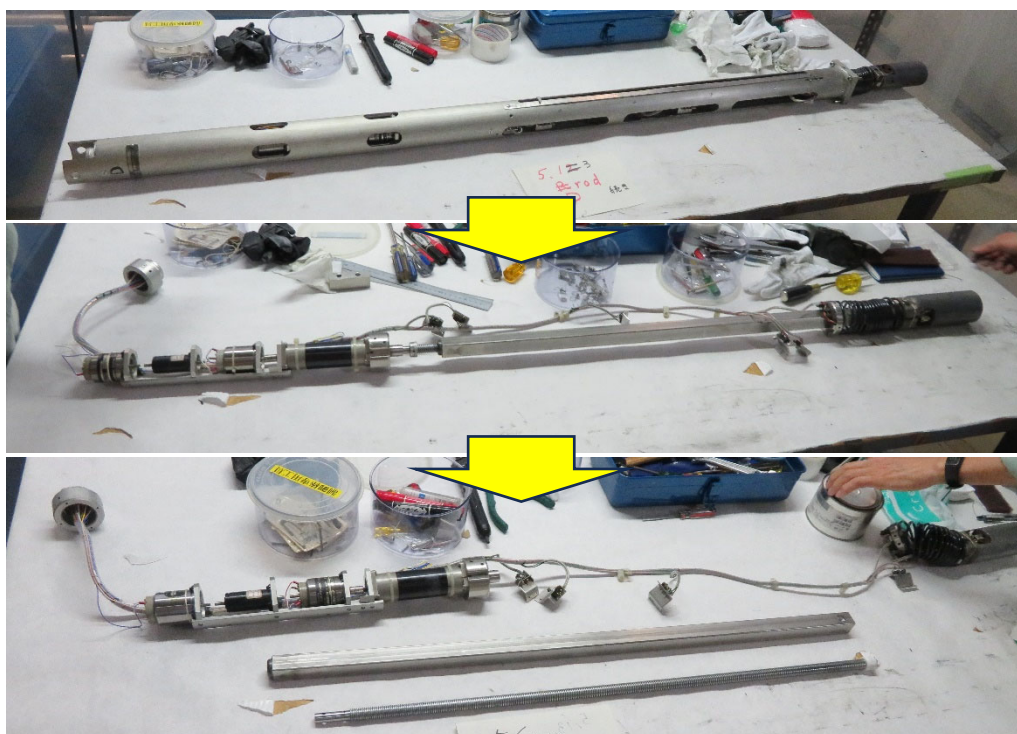


写真 8. 制御棒駆動装置は 100%職員の手で整備を行う

### 3. 計測制御系統施設の保守にかかる非定例業務

#### 3. 1. 設備の故障等、異常発生時の対応

KUR の計装系設備や制御系設備は適宜保守や更新を行っているものの、稀に落雷等の突発的事象や経年劣化による影響で動作不良を起こすことがある。それら故障等の影響で原子炉の安全が担保出来ないと判断される場合は起動を取りやめ、速やかに異常を取り除く必要がある。直近の十年で発生した計測制御系統施設にかかる異常のうち、以下のものを紹介する。

##### 3. 1. 1. KUR 自動運転に伴う Auto Shim 動作中の警報発生 (2017 年)

炉心の状態による炉物理的な影響、自動制御のための電気回路、制御棒駆動装置の機械的動作が要因となって核計装の警報が発報するという、計測制御系統施設の総合的な動作の例としてここで取り上げる。

KUR の自動運転中、制御棒の位置調整動作の一つである Auto Shim (※) が働いた際に出力が設定値 (1,000kW) より 5%以上大きくなり、警報が発報した。

※1 KUR の運転中はウランの核分裂により様々な元素が発生し炉心に蓄積していく。その中でもキセノン (Xe) やサマリウム (Sm) は中性子を吸収して原子炉の出力を下げる効果があるため、自動制御回路はその効果を打ち消して出力を一定に保つために微調整用制御棒を徐々に引き抜いていく。微調整用制御棒が一定の高さに達すると、今度は自動的に粗調整用制御棒 1 本が断続的に少しずつ引き抜かれ、逆に微調整用制御棒が挿入される。その後、微調整用制御棒が一定の位置まで挿入されると粗調整用制御棒の引き抜きが停止し、通常の自動制御状態に戻る。粗調整用制御棒を上昇させ微調整用制御棒を下降させるこの一連の自動的動作を Auto Shim と呼ぶ。

KUR にある 4 本の粗調整用制御棒は、炉心の状態やその制御棒の高さによって炉心へ及ぼす効果 (反応度付加率) が違って来る。当時の炉心では A rod がやや強い効果を持っており、Auto Shim によって A rod が引き抜かれた際、微調整用制御棒の挿入による出力の抑制が追い付かなくなっていたことが原因であった。Auto Shim は自動運転中に何度も繰り返し発生するが、当日は Auto Shim 用の粗調整用制御棒として

B、C、D rod のどれかを選択するようにし、後日 Auto Shim 回路の調整を行った。Auto Shim 時の粗調整用制御棒の引き抜き量が小さくなるよう設定し、その後は A rod による Auto Shim でも出力が上がり過ぎることはなくなった。

### 3. 1. 2. 停電検出時スクラム回路のリレーの誤動作による計画外停止 (2018 年)

計測制御系統施設のトラブルの中でも特に影響の大きかったものの一つである。

KUR の自動運転中、“AC POWER FAIL” (電源異常) によるスクラムが発生した。スクラム発生時に定められた各種点検を実施するとともにその週の運転を中断し、原子力規制委員会へ報告を行った。

その後原因を調査したところ、実際に電源に異常が生じたわけではなく、スクラム回路内のメカニカルリレー (※2) の一つが誤動作を起こしたらしいことが判明した。

※2 電流のスイッチングによってオンオフ信号を制御する電気部品。複数組み合わせることで論理回路を構成できる。

メカニカルリレーはメーカーによって動作回数を目安とする期待寿命が公開されているが、当時誤動作を起こした個体はまだまだその目安には達していなかった。それでも長年使用していると劣化が発生することもありうると思われる。不適合状態を除去するために AC POWER FAIL に関するリレーを交換してから KUR の運転を再開し、後日保守期間中にその他のメカニカルリレーもすべて交換した。また、施設管理実施計画を改定し、定期的にメカニカルリレーの交換を行うこととした。

### 3. 2. 設計及び工事の変更の承認申請 (設工認)

法令に定める技術基準にかかる設備を設置あるいは更新する場合、事前に原子力規制委員会に対して設備の仕様や工事の計画を説明し、承認を得る必要がある。承認後に施工を行い、その後に複合研検査小委員会による検査と原子力規制委員会の確認を受けてからでなければ設備を使用することが出来ないため、十分前もって準備を行う必要がある。直近の十年で計測制御設備に関して実施した設工認対象業務のうち、以下のものを紹介する。

#### 3. 2. 1. 新規制基準対応のための改造 (2016~2017 年)

2011 年の東日本大震災の際に起きた福島第一原子力発電所の事故を受け、原子力施設に係る法令が大きく見直された。KUR に係る承認等は文科省に代わって新しくできた原子力規制委員会が行うようになり、次々に施行される法律、規則、技術基準によって原子炉の設計、工事、品質保証体制等が規制を受けることとなった。新規制基準の中ではそれまで要求されていなかった安全基準も明文化されており、現状の設備では基準を満たさない設備は改造工事が必要となった。計測制御系統施設においては

- ・原子炉停止に関係する計装用ケーブルの隔離
- ・スクラム回路内メカニカルリレーの追加による回路の多重化
- ・一せい挿入回路の改造による原子炉停止条件の多様化

を行った。当時の原子炉実験所では 6 つの設工認申請が並行して進められており、その中で 10 以上の設備の再検討、改造工事が行われていた。さらには一つ一つの業務の進め方自体も品質保証関係の規制を受けて非常に負担が大きいものとなっており、技術職員皆で新しい法令を学びながらついていくために一生懸命であった。

#### 3. 2. 2. 中央管理室の移転 (2021~2023 年)

2021 年、複合研敷地内のライフラインの更新及び一部建屋の建て替え計画についての説明が行われた。建て替え対象には研究棟と呼ばれる建屋が含まれており、その部屋割りには教職員の居室や実験室と共に中央管理室が含まれていた。中央管理室には研究所内の各施設の情報を集めた監視盤が設置されており、その

機能は新しく建てられる第二研究棟へ移設されることになった。研究所内の施設には古いものも多く、設置当初の資料が見つからない場合は担当職員が現場の回路や配線を追って現状を調査する必要があった。新しい中央管理室や監視盤の設計についても確認すべき点が多かった。KUR からは原子炉タンクの水位や温度情報を中央管理室へ送っており、特に中央管理室から放送する非常警報は KUR や他施設の緊急停止回路と一部連動するため、新回路の設計に注意する必要があった。



写真 9. 2023 年に新設された中央管理室

#### 4. 計測制御系統施設保守の今後

現在のプロセス計装、核計装はそれぞれ 1999 年に設置されたものであり、設置後 25 年が経過している。メーカーと相談しながら機器の更新を行ってきているが、生産が停止している機器も多くその都度代替品の検討が必要である。

また昨今、機器のメーカーが原子力関連施設への納品を行わなくなることが増えている。プロセス計装設備を設置し現在は保守を行っている業者も、今後の受注は既設機器の保守のみに限ることを明言している。よって複合研の技術職員としては今後新たな業者を選定するとともに、その業者に既設設備の仕様を説明するような機会が発生すると思われる。

このように代替品や代替業者を選定する際には、通常の保守に比べて既設設備に関するより深い理解が求められることになる。

2011 年の福島原発事故以降原子力施設への法的な要求が増え続けており、技術職員の業務量も増す一方である。また KUR は使用済み燃料の処理に関する契約の関係で 2026 年 5 月に運転を停止するため、その後は使用済み燃料の取扱いや廃炉措置といったこれまでと全く違う業務が発生する。停止後はこれまで通りの保守業務は減少する（例えば核計装は全体が不要となる）と思われるが、そのことを差し引いても今後数年間、KUR に係る技術職員の負担はかなり増加するのではないかとと思われる。