

Back to **1962**

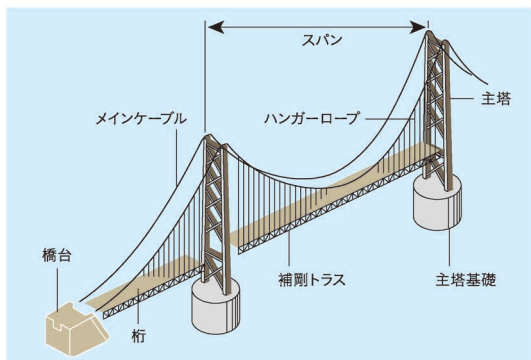
日本の経済成長とともに交通網の整備が急ピッチで進められた1960年代。  
若戸大橋の完成は、多くの人に夢を与え、新たな時代への架け橋となった。

# 東洋一の吊橋 「若戸大橋」が完成

北九州市の戸畑地区と若松地区を結ぶ若戸大橋が完成、東洋一の吊橋として注目された。  
総延長：約2.1 km、中央支間長：367 m、工法：ニューマチックケーソン、橋脚寸法：40 m×17 m、1962年完成（共同通信社）

## 北九州工業地帯をつなぐ 東洋一の架け橋

関門海峡を臨む九州最北端の都市、北九州市。北九州工業地帯の繁栄を支えてきた若松地区と戸畑地区であるが、両者は洞海湾を隔てた最短で1 kmにもならない位置にありながら、かつてその間を移動するには、自動車や鉄道などを利用して洞海湾奥まで20 km以上西に迂回するか、渡船を使うかのどちらかしかなかった。1930年に渡船転覆事故で多くの死者を出すという大惨事が起こり、これをきっかけにトンネル建設が検討されたが、第二次世界大戦の戦火拡大に伴い計画は中断された。



(図1) 吊橋の構造。

世界の長大橋の多くは吊橋である。メインケーブル、ハンガーロープ、桁は鋼製であり、主塔は鋼もしくは鉄筋コンクリート製である。一方、風や荷重によって揺れやすいという欠点がある。

戦後の復興とともに若松―戸畑間をつなぐ交通手段の整備が再び求められるようになり、トンネルか橋梁かが比較検討された結果、「若戸大橋」と名付けられた大型の吊橋が建設されることになった。1958年に着工し、1962年に完成。地元の人々の悲願であった若戸大橋は、「東洋一の吊橋」として大きな注目を集めた。建設には、当時の日本の最先端の橋梁技術が多く注ぎ込まれ、ケーブルや鉄筋、セメントなど、あらゆる材料に国産品が使用されたという。

ちなみに吊橋とは、主塔とそれに渡されるメインケーブルを持ち、メインケーブルから鉛直に垂らされたハンガーロープで桁を吊る構造の橋をいう<sup>(1)</sup>(図1)。このメインケーブルには高炭素亜鉛めっき鋼線が使われている。

吊橋に対し、ハンガーロープが無く、複数のケーブルを斜めに張って直接桁を支えるものは斜張橋と呼ばれる。吊橋のメインケーブルは垂れ下がり曲線を描くが、ハンガーロープとの2段構成とすることで、桁を水平に近い状態に保つ。メインケーブルの両端は、アンカーレイジ（橋台）で地面に固定される。

若戸大橋の場合、主塔間のスパン（中央支間長）は367 m

に及ぶ、それまで日本最大であった三好橋（徳島県）の中央支間長140 mをはるかに超えるため、安全で確実な工法の選定が求められた。このため、特に高い信頼性が求められる主塔の基礎に対しては、剛性の高い基礎を築く工法として、ニューマチックケーソン工法が採用された。

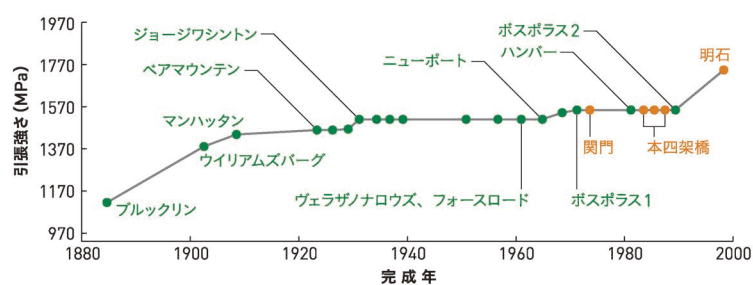
ニューマチックケーソン工法とは、地上でケーソン（コンクリート製または鋼製の大型の箱）を築造し、ケーソン下部の刃口部内側の掘削作業室に圧縮空気を送り込んで地下水の浸入を防ぎ、作業室内で掘削・排土・沈下を繰り返して所定の深さまでケーソンを沈設する施工法である。若戸大橋のケーソン本体は、自力浮揚で進水できる鋼製であった。

当時、若松側の主塔と中間塔の基礎工事と、ケーブルを固定する橋台の建設とその基礎工事などを担当した大成建設の記録によれば、ニューマチックケーソン工法による橋梁基礎工事は、その当時例の無い大規模なものであったようだ<sup>(2)</sup>。主塔では地下24.5 m、橋台では地下22 mの位置にケーソンが沈設され、最盛期には300人の作業員が高気圧のケーソン内で作業したという。また、若松側橋台の建設工事も、18000 m<sup>3</sup>ものコンクリートを打設する大掛かりなものとなった。ここでは、コンクリートの打ち込み温度を低下させることで熱応力によるひび割れを制御するプレクーリング工



(図2) 明石海峡大橋。

総延長：約4 km、中央支間長：1991 m、工法：設置ケーソン、橋脚（主塔基礎）寸法：φ80 m、1998年完成（共同通信社）



(図3) 橋梁ケーブル用鋼線の引張強度の変遷。

一般社団法人日本鉄鋼連盟ホームページを元に作成<sup>(4)</sup>

法や、型枠を順次迫り上げるスライディングフォーム工法など、当時の最新技術が国内で初めて採用された。

なお、1984年には交通量の増大に伴い2車線から4車線への拡幅工事が行われ、歩道の廃止、拡幅部の供用が行われた。これは、主構造をほとんど改造せず形状変化の管理を行いながら拡幅するという、わが国初の工事となった。

## 世界の長大橋に不可欠な日本の橋梁技術

1962年の若戸大橋完成は、日本における長大橋建設構想の契機となった。中でも一大プロジェクトとなったのは、本州と四国とをつなぐ本州四国連絡橋計画である<sup>(3)</sup>。明石-鳴門、児島-坂出、尾道-今治の3つのルートに連絡橋を架けるこの計画は、1975年に尾道-今治ルートの大三島橋の着工に始まり、その後1999年までの間に多くの長大橋梁が建設された。

これらの3ルートの中で最も技術的に困難であるとされていたのが、明石海峡大橋の建設である。明石海峡は潮流が速く、台風が多い。そして、船舶の航行が多く、神戸空港や関西国際空港を離着陸する航空機が頻りに飛び交う。さらに、橋の直下に

活断層の存在が知られていたことから、高度の耐震性能も要求される。このため、当初は道路・鉄道併用橋として計画されたが、地盤や予算の面から着工の3年前に道路専用橋に設計変更された。そのような厳しい条件をクリアした上で、全長3911 m、中央支間長1991 mの長大吊橋が1998年に完成した(図2)。この大きさは、当時世界最長のハンバー橋(1410 m、イギリス)をはるかに超えるものであった。また、建設中の1995年に兵庫県南部地震に見舞われ、地盤に約1 mのズレが生じたが、橋梁構造物への影響は無く、工事は継続され、開通後も何ら影響は出ていない。

明石海峡大橋の建設に当たっては、それまでの長大橋の建設を通じて培ってきた高度な橋梁技術が結集された。主塔を支える海中基礎の建設に際しては、瀬戸大橋建設の際に用いた設置ケーソン工法(陸上で製作したケーソンを海上を曳航して現地へ運んで海底に沈めた後、内部にコンクリートを打設する施工法)が採用された。また、橋桁にはトラス桁(細長い材料を三角形に組み合わせた断面形状を持つ桁)を採用し、

道路面にはグレーチング(開口のある床構造)を設けることなどによって、強風に対しても強い構造を作り上げた。

橋桁を吊るメインケーブルには、引張強度1770 MPa級の高強度鋼線が使われた。メインケーブルを高強度化すればケーブル断面積や本数を減少して軽量化でき、架設工事の効率化、主塔高さの低減や工期短縮等につながる。中央支間長が1991 mと世界最長である明石海峡大橋では、若戸大橋などそれまでの長大橋で使われてきた引張強度1570 MPa級の鋼線ではなく、1770 MPa級鋼線が初めて採用された(当時の新日本製鐵が製造)。明石海峡大橋は吊橋の規模だけでなく、日本の橋梁技術や材料技術の水準を世界に知らしめた(図3)。

近年、海外では長大橋の建設が活況を迎えており、トルコのイズミット湾横断橋、中国の港珠澳大橋などの建設が進められている。中国などの鋼線メーカーの台頭も目立つ中、靱性および延性を確保しつつ高強度化を進め、世界をリードしてきた日本の高強度鋼線の進化を世界が見守っている。

## 文 献

- (1) 吉田巖：吊橋を支える基礎 若戸橋から明石大橋へ、総合土木研究所(2012)。
- (2) たいせいCircle (大成建設株式会社報告書), 84 (2015), 7-8.  
([https://www.taisei.co.jp/MungoBlobs/687/86/jigyohokoku2015\\_01.pdf](https://www.taisei.co.jp/MungoBlobs/687/86/jigyohokoku2015_01.pdf))
- (3) 公益社団法人発明協会戦後日本のイノベーション100選事務局：長大橋建設技術、現代まで、戦後日本のイノベーション100選。  
([http://www.koueki.jiii.or.jp/innovation100/innovation\\_detail.php?eid=00102&age=present-day](http://www.koueki.jiii.or.jp/innovation100/innovation_detail.php?eid=00102&age=present-day))
- (4) 一般社団法人日本鉄鋼連盟：橋梁用高強度ワイヤ。  
([https://www.jisf.or.jp/business/tech/bridge/high/09\\_wire.pdf](https://www.jisf.or.jp/business/tech/bridge/high/09_wire.pdf))

# Back to 1962

日本では、1950年代に研究用原子炉の建設、運転、利用が始まった。今から60年前の1962年に初臨界に達した「JRR-3」は日本の技術で設計、製作された初めての研究用原子炉である。研究炉の建設・運転の技術開発に貢献したJRR-3はその後改造工事が施され、中性子利用施設として活用されている。2021年2月から運転を再開したJRR-3の歴史を振り返り、期待される役割について紹介する。

(図1) JRR-3が初臨界に達したときの制御室の様子 (1962年9月13日)。



(図2) 建設当時の建屋全景。

## 国産初の 研究用原子炉が臨界

### 国産1号炉として 原子炉技術の確立に貢献

JRR-3 (ジェイ・アール・アール・スリー: Japan Research Reactor No. 3) は、日本原子力研究所 (現・国立研究開発法人日本原子力研究開発機構) が建設した熱出力10 MWの天然ウラン重水型の研究用原子炉である。天然ウラン重水型が採用された背景には、人形峠 (鳥取・岡山県境) で発見されたウランの使用や、重水冷却の技術開発などの目的があった。

JRR-3に先立って建設されたJRR-1およびJRR-2は輸入炉であったが、計画、設計、製作のすべてを日本の技術者が行い、ウラン燃料の一部や重水以外はほとんど国産品を使用していることから、JRR-3は「国産1号炉」と呼ばれている<sup>(1)(2)</sup>。

1959年に始まったJRR-3の建設は、原子炉本体が日立製作所、水ガス系が三菱原子力工業、計測制御系のうち炉本体周りの計測を東芝、水ガス系の計測を富士電機製造、放射性同位元素取扱設備関係を石川島重工業がそれぞれ中心となって進め

られた。複数メーカーの複合方式で建設を進めたことは必ずしも効率的ではなかったが、日本の原子炉建設技術の開発促進と向上に大きく貢献し、JRR-3の建設が日本の研究炉に関する技術の基礎を固めることになった。

JRR-3が初臨界を迎えたのは1962年9月13日で、定格出力運転を達成したのは1964年3月31日であった (図1)。

炉心は直径約2.6 m、高さ約2.8 mのタンク型で、約9 tの天然ウラン燃料が装荷されていた。天然ウラン燃料の被覆材は、燃料温度、中性子吸収、誘導放射能などを考慮し、加工性がよい99.3%以上のアルミニウムが選択された。現在の燃料は、ウラン・シリコン・アルミニウム分散型合金燃料で、被覆管にはアルミニウム合金 (A6061またはAG3NE) が使用されている。

1966年から本格的な利用運転に入ったJRR-3は1983年に運転を停止し、大規模な改造工事が行われた。これは中性子強度などが当時の研究者の要望に対応できなくなったためで、世界トップクラスの汎用研究炉を目指して改造が施された (図2)。

改造炉では、燃料のウラン濃縮度を高め

ることなどにより熱出力は20 MWに向上し、最大熱中性子束は旧JRR-3よりも一桁大きい約 $3 \times 10^{18}$  個/( $m^2 \cdot s$ )を実現した。

また、改造炉には中性子導管が設置され、ビーム実験の利用効率が飛躍に向上した。さらに、試料を入れたアルミニウム容器 (ラビット) を水圧で原子炉内の照射筒内に送り込み、任意の照射時間で取り出すことができる水力照射設備が設置され、照射試験の自由度を向上させている。

1990年から共同利用が開始されたJRR-3の基本設計は、その後に設計された研究炉のモデルになったという。また、2007年には、原子力技術の改良や適用および原子力の平和利用のために役立つ非常に優れた成果を達成した施設やサイトに対して贈られる米国原子力学会ランドマーク賞を受賞している。

### 多彩な研究に利用可能な プラットフォーム

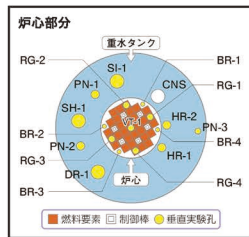
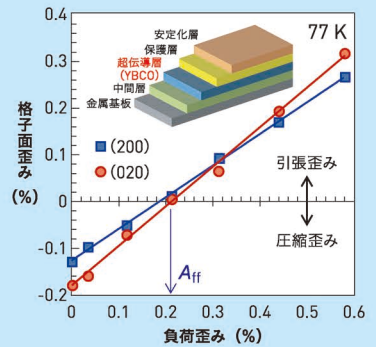
旧JRR-3で行われていた材料研究は、誘電体、磁性体、超伝導体、金属材料に



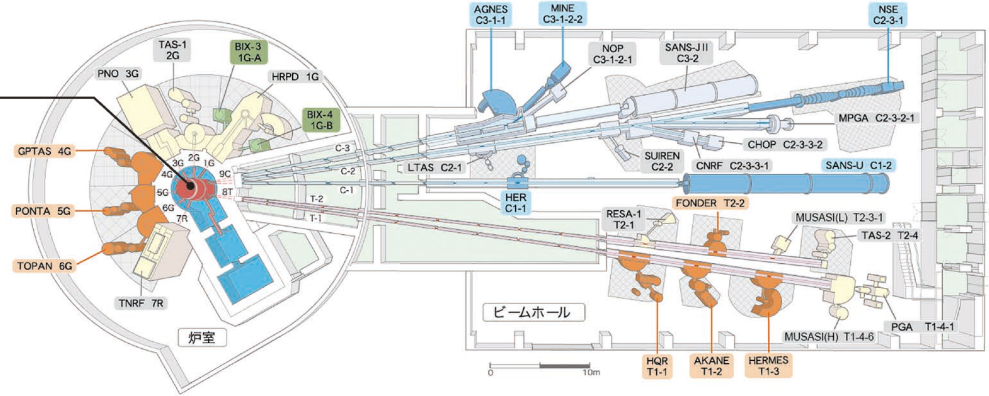
(図3) 改造後のビームホールの様子。

(図5) JRR-3を活用した実験例 (複合超伝導線材YBCOテープの歪み挙動)。

77 KでのYBCO超伝導相の200および020回折面の格子歪みの変化。A<sub>ff</sub>が超伝導相の格子面歪みがゼロになる負荷歪みを示している。



| 設置者                    | 熱中性子利用装置 | 冷中性子利用装置 |
|------------------------|----------|----------|
| JAEA<br>日本原子力研究開発機構    |          |          |
| UNIV<br>東京大学、東北大学、京都大学 |          |          |
| QST<br>量子科学技術研究開発機構    |          |          |



JRR-3諸元

- 目的：ビーム実験、燃料材料照射、RI製造、放射化分析など
- 型式：低濃縮ウラン軽水減速冷却プール型
- 最大熱出力：20 MW
- 最大熱中性子束：約 $3 \times 10^{18}$ 個/( $m^2 \cdot s$ )
- 所在地：茨城県那珂郡東海村

(図4) JRR-3の中性子ビーム実験装置配置図。

炉心と重水タンクには17の照射孔、炉室には9台の実験装置、ビームホールには21台の実験装置が設置されている。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の資料を元に作成

関する基礎物性研究が中心であり、格子振動と構造相転移や磁区構造とモーメント分布、磁氣的励起などをテーマとした研究が行われていた。

改造後のJRR-3では、5本のビームラインを有するビームホールが増築され(図3)、基礎物性研究に加え、応用研究や実用化に資するための材料開発研究が大幅に増加している。炉心と重水タンクには17の照射孔、炉室には9台の実験装置、ビームホールには21台の実験装置が設置されている(3)(図4)。

J-PARCなど、中性子ビームを利用できる施設はいくつかあるが、JRR-3では実験材もしくは限りなく実験に近い大型構造材料などが実際に利用される環境に近い条件で実験を行えることが特長の一つになっている。

例えば、複合超伝導線材であるYBCOテープは超伝導層(YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>相)の他にも保護層や安定化層などを持った複雑な構造になっているが、中性子ビームによる観測は、YBCO超伝導層の歪みを計測可能で、極低温における超伝導線材の機械的特性と臨界電流特性の関係を明らかにし

ている(4)(図5)。

また、中性子ビームを用いることで水素などの軽元素が観察可能となることから、水素脆化のメカニズムの解明などに利用されている。ユニークな活用例としては、コンクリート中の水分挙動を観察することで、鉄筋コンクリート構造物の劣化診断や構造物の耐久性向上にかかわる技術の高度化などを旨とする研究が挙げられる(5)。

これらは2010年までの成果で、JRR-3は定期点検中に東日本大震災に被災し、その後も長期にわたって復旧と耐震工事などのために、運転を停止していた。停止期間中は一部のビームラインの改造も行われ、中性子導管をニッケルミラーからニッケルとチタンの薄膜を約400層重ねた高性能スーパーミラー(6)にすることで、利用できる中性子強度を2倍近く向上させるなどの機能

強化も行われている。JRR-3は2021年2月に運転を再開し、本格稼働へ向けての調整作業が行われている。

JRR-3は材料研究に加えて、放射性同位元素の製造技術の開発という役割も担っている。特に医療用では、がんの診断に利用される<sup>99m</sup>Tcの国内製造のニーズが高く、再稼働後のJRR-3には医療用RIの製造にも大きな期待が寄せられている。その他、中性子を利用した放射化分析や即発ガンマ線分析も、少量の試料を非破壊で多元素同時分析が可能な高性能の分析手法として普及していくと予想される(7)。

運転を再開したJRR-3には、多彩な中性子利用が可能なプラットフォームとしての役割が期待されている。

画像および資料提供：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

## 文 献

- (1) 研究炉管理部：研究炉33年のあゆみ、日本原子力研究所(1990)。
- (2) 飯島勉、宮坂靖彦、白井英次：日本原子力学会誌ATOMOZ, 57(2015), 766-771。
- (3) <https://jrr3.jaea.go.jp/2/21.htm> および <https://jrr3.jaea.go.jp/2/22.htm> を元に作成
- (4) K. Osamura, S. Machiya, Y. Tsuchiya and H. Suzuki: Supercond. Sci. Technol., 23(2010), 45020。
- (5) 兼松学、野口貴文、丸山一平、飯倉寛：コンクリート工学年次論文集, 29(2007), 981-986。
- (6) K. Soyama, H. Tsunoda and K. Murakami: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 529(2004), 73-77。
- (7) 平井昭司、鈴木章信、永野章、米沢伸四郎、松江秀明：鉄と鋼, 100(2014), 53-67。