高速增殖原型反应堆“文殊”的燃料体取出技术

Unloading and Handling Technology of the Fuel Assembly in Prototype Fast Breeder Reactor “Monju”

古贺　和浩 KOGA, Kazuhiro

高速增殖原型反应堆“文殊”目前正处于报废处理的第一阶段，即燃料体取出期。取出时使用了富士电机交付的燃料处理设备，燃料体的处理工作等按计划顺利进行。富士电机通过派遣技术人员等方式向运营商 JAEA 提供了技术支援，克服了未曾经历过的困难，顺利地完成了任务。通过实施燃料体取出作业，证实了该技术的可行性。今后，富士电机仍将继续获取燃料处理设备的实机运行数据。通过对实机运行数据进行评估，并将结果反映到新型反应堆的新一代高速反应堆的相应设备中，有望对高速反应堆开发形成助力，为低碳社会做出贡献。

The prototype fast breeder reactor Monju is currently in its first stage of decommissioning. The fuel handling facility system provided by Fuji Electric was used to unload and handle the fuel assembly as scheduled. Fuji Electric provided technical assistance, such as dispatching engineers to the JAEA, and overcame problems that has not arisen before to complete the project, thus proving our solid technology for the unloading and handling of the fuel assembly. We will continually acquire and evaluate actual operation data on the fuel handling facility system. Reflecting the results into the design will contribute to the development of next-generation fast reactors, which are essential part of supporting a low-carbon society.

1　引言

高速增殖原型反应堆“文殊”是高速增殖堆（以核燃料增殖为目的的核反应堆）的原型反应堆（**图 1**）。普通的核反应堆是轻水堆，使用水作为冷却材料，而高速增殖堆则使用钠（液态金属）。

2016 年，日本决定将“文殊”进行报废。2017 年 6 月，开始了报废处理的第一阶段——“燃料体取出(注)”，预计到 2022 年 12 月结束，约耗时 5 年半（**图 2**）。燃料体取出时使用了富士电机交付的燃料处理设备，截至 2020 年 6 月按预定计划进行了两次“燃料体处理”和一次“燃料体的取出”（**图 3**）。

富士电机通过派遣技术人员等方式向运营商，即国立研究开发法人日本原子力研究开发机构（JAEA）提供了技术

图 1　高速增殖原型反应堆“文殊”
（照片提供：日本原子力研究开发机构）

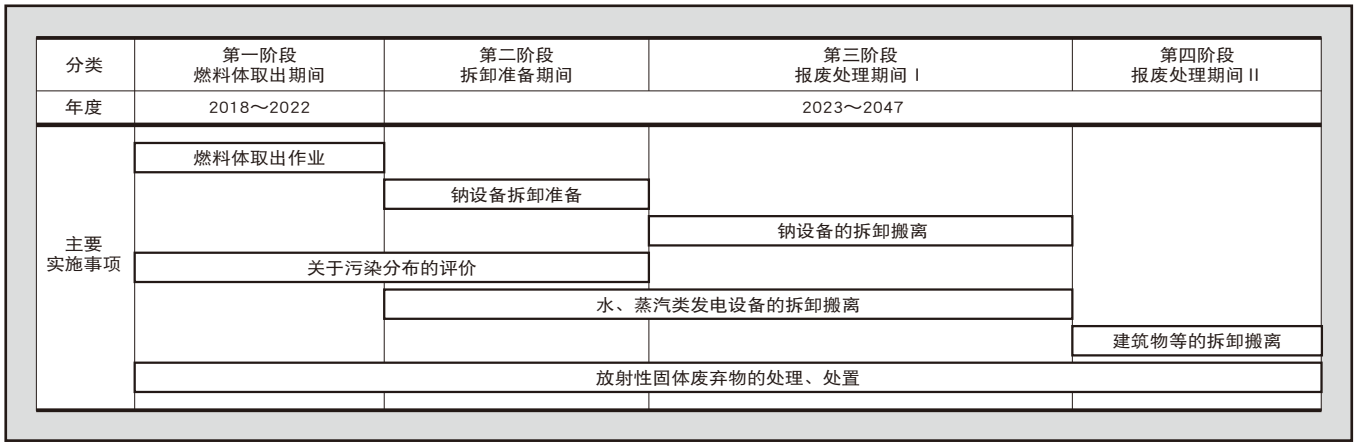

图 2　报废处理的所有工序
（资料提供：日本原子力研究开发机构）

〈注〉燃料体取出：燃料体取出是“燃料体处理”与“燃料体的取出”的总称。燃料体是指装载在核反应堆上的核燃料处理用组件。

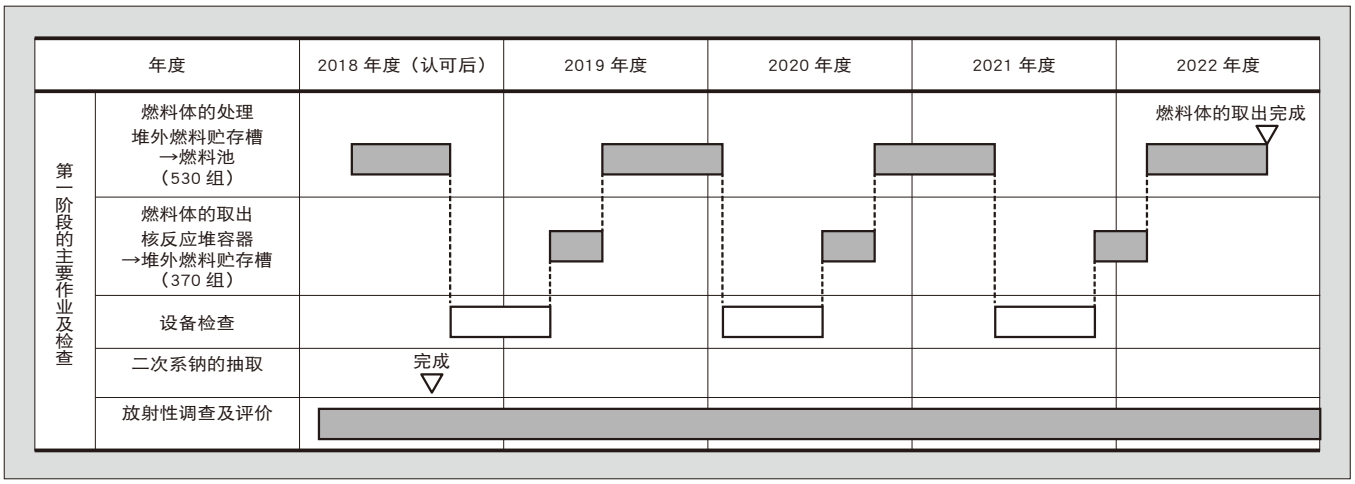

图 3　第一阶段（燃料体取出期）的工序
（資料提供：日本原子力研究开发机构）

支援，克服了未曾经历过的困难，顺利地完成了任务。

本文将对燃料体取出时处理操作的实施内容及其技术概要进行介绍。

2　“文殊”现状

进入报废处理程序后的“文殊”中，停机后的核反应堆中还装有燃料体等。当务之急是着手进行国家和自治体要求的尽早取出燃料体和与水反应性强的危险品钠。

在第一阶段（2022 年 12 月前），计划完成共 530 个燃料体的处理，以及共 370 个燃料体的取出作业。截至 2020 年 6 月，已按计划完成合计 260 个燃料体的处理，以及 100 个燃料体的取出作业。

3　燃料体取出技术

燃料体取出所用的燃料处理及贮存设备如**图 4** 所示。另外，燃料体取出的转运路线如**图 5** 所示，燃料体取出作业的工序和所用设备如**表 1** 所示。所用设备要求具备燃料体的拆装、升降、转运、冷却、清洗、气密保持、遮蔽等各种功能，由多台设备分担并合理地协作。

另外，燃料体取出需要使用尖端技术以远程、安全地处理钠中和水中燃料体。特别是液态金属钠，其中的燃料体状态无法进行肉眼观察。

附着在燃料体等上的钠极易与空气中的氧气和水蒸气发生反应，因此要防止其与空气接触。另外，为了防止固化（凝固），温度需要一直维持在 100 ℃以上。基于上述因素，燃料体的处理难度极高。

3.1　燃料体的处理

处理时，要将燃料体暂时贮存在堆外燃料贮存槽中，随后将燃料体转运至燃料清洗设备，并清洗（除去）附着的钠，最后贮存在燃料池的贮存格架。

⑴　使用设备

进行燃料体处理作业时，使用燃料处理及贮存设备（**图 4**）中的以下设备。

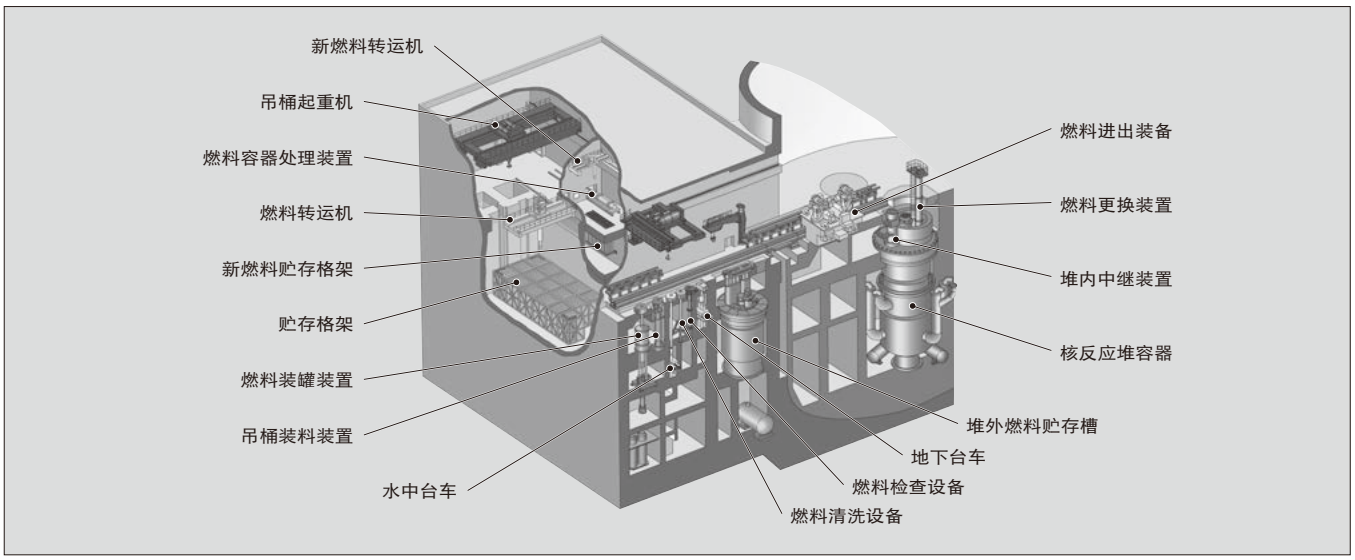

图 4　燃料处理及贮存设备

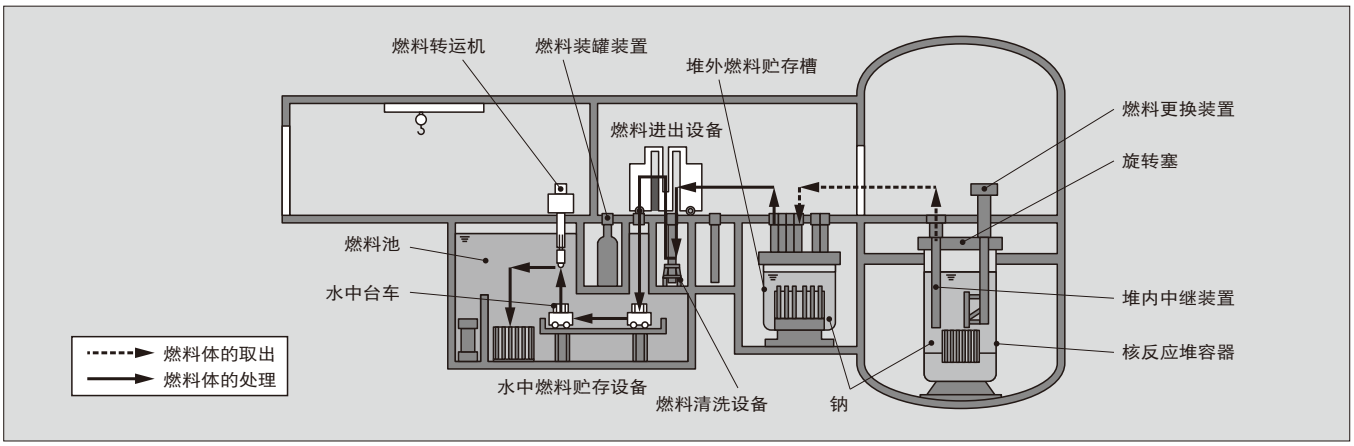

图 5　燃料体取出的转运路线

表 1　燃料体取出作业的工序和使用的设备

工序	内容	使用设备
燃料体的取出	指将燃料体从核反应堆容器转运至堆外燃料贮存槽	燃料更换设备
		燃料进出设备
		堆外燃料贮存槽
燃料体的处理	将燃料体暂时贮存在堆外燃料贮存槽中，随后将燃料体转运至燃料清洗设备，并清洗（除去）附着的钠，最后贮存在燃料池	燃料进出设备
		堆外燃料贮存槽
		燃料清洗设备
		燃料装罐装置
		水中台车、燃料转运机、贮存格架
		地下台车、新燃料转运机、新燃料贮存格架

(a)　燃料进出设备（**图 6**）

燃料进出设备是在核反应堆容器及各设备（堆外燃料贮存槽等）之间转运燃料体等的设备，是燃料体处理作业中的主体设备。如下所示，该燃料进出设备由处理附着钠的燃料体等的燃料进出机主体 A、处理除去钠之后的燃料体等的燃料进出机主体 B 这 2 台处理机及其他机器构成。

①　燃料进出机主体 A

在钠中或钠雾环境（钠金属粒子分散在大气中）中处理燃料体等的设备，主体内利用氩气保持气密。

②　燃料进出机主体 B

在水中或潮湿环境中处理燃料体等的设备，主体内利用空气保持气密。

③　燃料进出机冷却装置

由针对收纳在燃料进出机主体中的已使用燃料体的发热问题，可供应冷却气体并进行排气（循环）的机器和配管等构成，有主体 A 用和主体 B 用两种。

④　移动台车

搭载主体 A、主体 B 和冷却装置进行移动，将主体精确定位到各设备。

(b)　堆外燃料贮存槽

在钠中进行燃料体等的中继贮存、已使用燃料体放射性衰减等待的储存设备。

(c)　燃料清洗设备

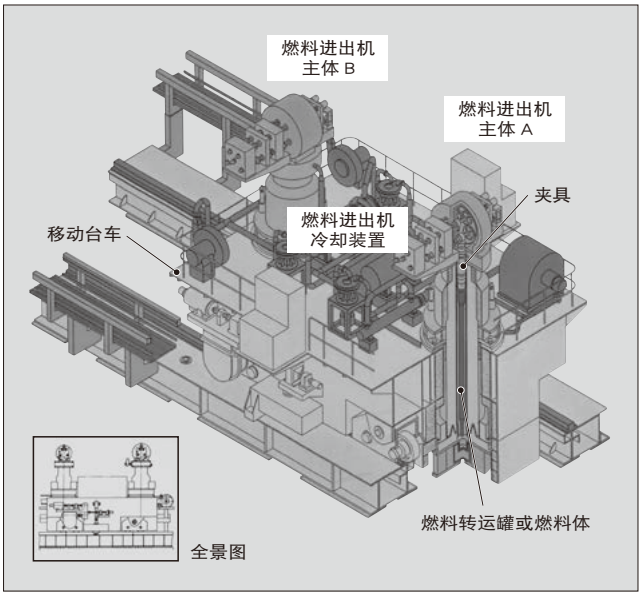

图 6　燃料进出设备

用蒸汽和水清洗（除去）已使用燃料体等上附着钠的设备。为了防止钠和水的急剧反应，该设备最初供应蒸汽，使钠与水缓慢发生反应。

(d)　燃料装罐装置

将清洗后的燃料体等进行水中装罐的设备。水中装罐是指利用燃料装罐装置将燃料体与水一起封装于罐中。

(e)　水中台车、燃料转运机、贮存格架

用于从燃料进出设备接受裸露状态或装于水中装罐的贮罐中的已使用燃料体等，在水中进行站外搬出等待贮存的设备。

(f)　地下台车、新燃料转运机、新燃料贮存格架

用于在燃料体处理作业前接收搬入站内的模拟燃料体（模拟了燃料体外形）及贮罐，并在室内大气中暂时贮存的设备。

另外，在处理燃料体时，该设备可将模拟燃料体和贮罐交接给燃料进出设备。

(2)　燃料体处理作业概要

水中装罐时的燃料体处理作业概要如下。为了在确保安全的同时让多台设备进行协作，采用只需按面板上闪烁的按

钮即可远程进行自动化操作的设计结构。

(a) 堆外燃料贮存槽保持着约 200 ℃的液体钠。取出贮存在该贮存槽中的已使用燃料体，清洗后进行水中装罐，贮存在贮存格架中。

(b) 在与贮存取出燃料体的堆外燃料贮存槽的相同位置，取出贮存在新燃料贮存格架中的模拟燃料体，并进行贮存。堆外燃料贮存槽装料之前，进行预热，抑制与钠的温度差。

为了确保每个燃料体和模拟燃料体的安全并缩短总作业时间，将 a 和 b 工序分别细分，对逐次作业和并行作业进行适当组合，制定作业程序。

(3) 燃料体处理的实际业绩

(a) 第一次：2018 年 8 月～ 2019 年 1 月

以处理 100 个燃料体为作业目标。但是，如第 4 章所述，由于发生了一些未曾经历过的困难，因此只分别进行了 86 个燃料体的处理和模拟燃料体的转运。

(b) 第二次：2020 年 2 月～ 6 月

以处理 130 个燃料体为作业目标。根据第一次的经验所制定的对策发挥了效果，共计处理了 174 个燃料体，完成了 140 个模拟燃料体的转运。

3.2 燃料体的取出

在燃料体的取出工序，需要将核反应堆（堆芯）的燃料体取出，装入（暂时储存）堆外燃料贮存槽，在取出燃料体后的堆芯位置装入模拟燃料体。

(1) 使用设备

燃料体的取出时，使用燃料处理及贮存设备（**图 4**）中的以下设备。

(a) 燃料更换设备

由在核反应堆容器内的钠中转运燃料体等的以下设备构成。

① 燃料更换装置

将燃料体等从堆芯抽出，并将其插入堆芯的设备。

② 堆内中继装置

在燃料更换装置和燃料进出机主体 A 之间进行燃料体等交接的设备。

(b) 燃料进出设备（**图 6**）

燃料体的取出时，在核反应堆容器（堆内中继装置）和堆外燃料贮存槽之间转运燃料体等的设备。

(c) 堆外燃料贮存槽

(2) 燃料体的取出作业概要

燃料体的取出作业与燃料体处理一样，采用远程自动方式进行。

抽出核反应堆（堆芯）的已使用燃料体进行转运，储存于堆外燃料贮存槽中。将贮存在堆外燃料贮存槽中的模拟燃料体取出，转运并插入装有该燃料体堆芯的相同位置。该燃料体和模拟燃料体的处理逐一进行，为确保安全、缩短总作业时间，作业流程对工序分别细分，制定对逐次作业和并行作业进行了适当组合的作业程序。

(3) 燃料体的取出的实际业绩：2019 年 9 月～ 10 月

按目标完成了 100 个燃料体的取出和 100 个模拟燃料体的转运。

4 针对未曾经历过的困难情况采取的应对措施

第一次燃料体处理，是首次正式作业。因此，遇到了很多未曾经历过的困难。主要情况及其对策如下：

(1) 钠化合物附着导致扭矩上升

(a) 情况概要

处理燃料体时，通过燃料进出机主体 A（**图 7**）内部夹具（**图 8**）爪的开关来拆装燃料体等。通过从上部夹具驱动装置卷入、卷出不锈钢带，进行燃料体等的拆装和升降。该夹具爪开关时，扭矩比设计阶段的设想值有所上升。

(b) 原因推测

通过目视确认夹具后发现，夹具表面附着很多钠化合

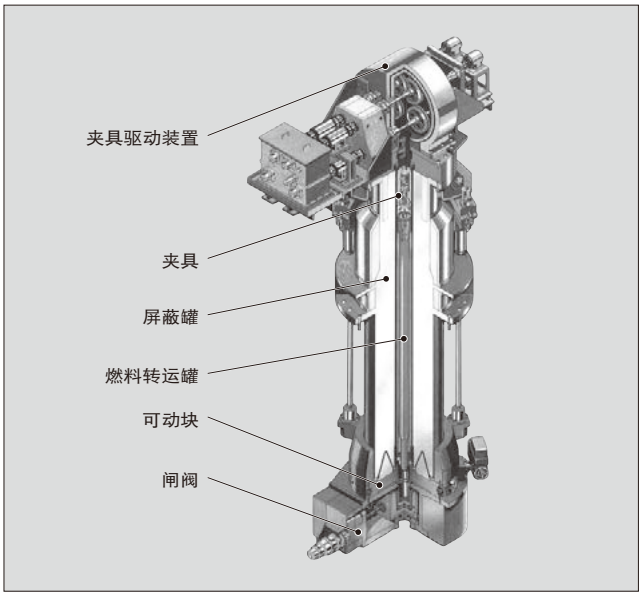

图 7 燃料进出机主体 A
（主体 B 原则上也是同一结构）

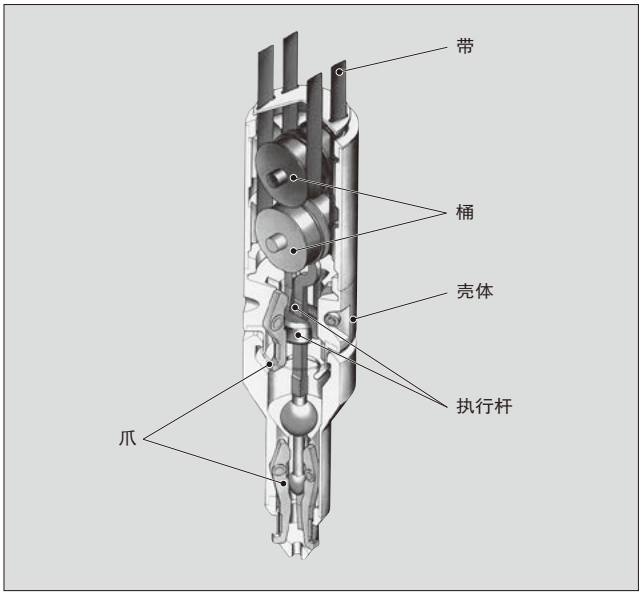

图 8 燃料进出机主体 A 夹具

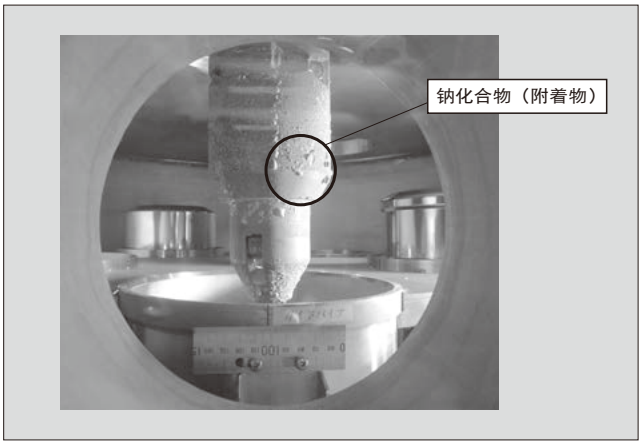

图 9　夹具下部的外观

物（**图 9**），该附着物妨碍了夹具爪的开关等。处理燃料体等时，夹具和不锈钢带上附着钠，该附着的钠变成氢氧化钠和氧化钠等化合物并固化，使各滑动单元被固定，导致扭矩上升。

在燃料清洗设备的清洗工序，清洗完毕后排放燃料清洗槽内的水，为了从燃料进出机主体 A 接收附着钠的燃料体，对燃料清洗槽内进行干燥。但是据推测，其原因是由于在干燥工序和气体置换不充分的情况下，将主体 A 和燃料清洗槽连接，夹具等暴露在露点高的环境中，或水分转移到主体 A 内造成的。

测量燃料清洗槽内的露点温度后，发现清洗后的干燥不充分。由此可知，因燃料清洗槽内的干燥不充分，产生的残留水分导致附着在夹具等上的钠形成了化合物。

(c)　对策的实施

为了强化燃料清洗槽内的干燥功能，在燃料清洗槽和旁边的配管上追加了加热器及保温材料，同时在总作业时间不变长的前提下，延长了干燥工序的时间、增加了气体置换次数。采取上述对策后，开始了第二次燃料体处理。

(d)　对策的效果

第二次燃料体处理时，初期出现过第一次确认过的异常扭矩上升，但之后未再出现，表现出了稳定的扭矩。

另外，燃料清洗槽内的露点温度也降至 −60 ℃以下，趋于稳定，情况确实得到明显改善。

(2)　钠化合物附着导致的闸阀无法全关

(a)　情况概要

处理燃料体时，把燃料体放入主体内，然后将下部的闸阀全关。但是，因为该闸阀无法全关，阀座发生了密封泄漏。

(b)　原因推测

滴至闸阀阀体的纳渗入阀体与壳体间缝隙后，变成了氢氧化钠和氧化钠等化合物，发生固化，妨碍了阀体的动作和阀座的密封性。化合物生成的原因在于水分未能充分除去，与上述夹具爪开关时的扭矩上升相同。

(c)　采取的对策

与前述相同，改善了燃料清洗槽内的干燥工序。

(d)　对策的效果

在第二次燃料体处理时，闸阀开关正常，未出现第一次发生的闸阀无法全关现象。

5　后记

以上介绍了高速增殖原型反应堆“文殊”的燃料体取出技术。在燃料体取出方面，富士电机给予国立研究开发法人日本原子力研究开发机构以协助，燃料体处理期间派遣了技术人员进行支援，克服了未曾经历过的困难，顺利地完成了任务。

此外，通过燃料体处理作业，证实了燃料体取出技术的实力。各项作业均获取了燃料处理设备的实机运行数据，今后仍将继续获取数据。作为制造商，富士电机今后拟通过对实机运行数据进行评估，并将评估结果反映到新型反应堆的新一代高速反应堆的相应设备中，积极投入高速反应堆开发，为低碳社会做出贡献。

参考文献

(1)　古賀和浩ほか . 高速増殖原型炉もんじゅ　廃止措置と燃料体取出し作業に向けて . FAPIG. 2018, No.194.

(2)　古賀和浩ほか . 高速増殖原型炉もんじゅ　燃料体取出し作業の開始 . FAPIG. 2020, No.196.

(3)　原子力規制委員会 . もんじゅ廃止措置安全監視チーム会合資料 .

古贺　和浩

从事高速反应堆“文殊”等的工程设计业务。现就职于富士电机株式会社发电成套设备事业本部发电事业部原子力后端技术部。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。