

福岛核废水只能排入大海吗？为何其他处置方案不受日本政府青睐？

日本政府“独排众议”，很可能在日后成为风险沟通的负面教材。



2023年8月24日，韩国釜山，有请愿抗议日本将福岛核电站处理过的放射性水排入太平洋。摄：Minwoo Park/Reuters/达志影像

张郁婕刊登于 2023-08-28

[#日本核废水排海](#) [#核废水](#) [#福岛](#) [#福岛核灾](#) [#核电](#) [#评论](#)

（张郁婕，大阪大学人间科学研究科共生学系的グローバル共生学讲座多文化共生硕士班、台湾清大工科系。）

福岛第一核电站的核废水问题，始终在面对一个现实：事故之后，因为降雨还有地下水位的关系，每天都会产生新的核废水，而现在福岛第一核电厂厂区内快要没有这么多空间可以存放更多核废水。所以关于核废水，要解决的问题关键是“这些核废水最终该如何处置”。如果只是停留在“厂区内空间不够用，所以需要寻找更多土地来存放核废水”，那就只是在“延长”不得不正视这个问题的时间，并没有真的“解决”问题。

然而，核废水是一个工程问题，要解决的问题只有“分析各种可行方案，找出最能在工程师（人类）掌控之下的最终处置办法”而已。但要采取哪一种方法、在什么时间点开始执行，则是政治问题。这就如同疫情期间，各国要如何执行防疫措施，并不是传染病专家要求或规定民众要怎么做，而是由传染病学专家分析疫情状况、向政府提出建议，最后由各国最高的疾病管制机构或是最高行政首长颁布防疫规定。例如：要求民众出门要戴口罩，呼吁民众非必要情况尽量减少外出频率等。

这个状况在福岛第一核电站的核废水问题上相当明显——决定采用排海方案的是日本政府，决定在2023年8月24日开始排放的也是日本政府。专家小组提出并分析各种方案的可行性，最终交由日本政府做一连串的选择，而日本政府每一次的选择，以及日本政府在做出每一个政治判断的前后分别做了哪些事情、哪些事情没有做、哪些事情做得不够好，这些都是可以被检视与讨论的。

本文并不打算针对日本政府的政治判断做过多评价，而是要谈谈在日本政府选定排海方案之前，曾经讨论过哪些方案，以及这些方案讨论到最后为什么石沉大海。





2023年8月24日，日本福岛县大隈町的福岛第一核电站鸟瞰图，该电站开始向太平洋释放经过处理的放射性水。摄：Kyodo/via Reuters/达志影像

## 最终去向只有“陆、海、空”三种

早在2013年，日本政府的专家小组便开始讨论核废水最终处置的可行方案。从大方向来看，这些水最终只有3种去向：（1）埋入地底、（2）排入大海、（3）释放到大气中，也就是陆、海、空。“陆”只有埋入地底，不包括储存在地面上，因为这么做等于没有解决问题，只是在拖延不得不正视陆面储水空间不足的时间而已。但文章稍后会提到，环团近年提出的“陆”方案，还包括一种存放在陆面上的，只是核废水的最终形态不是液状。

虽然核废水最终可能的去向，就是只有陆、海、空这3种，但依据前置作业的步骤，以及核废水的最终形态，核废水最终处置方法还可以分得更细。

首先，现在从福岛第一核电厂厂房内汲取上岸的核废水，里头含有事故后炉心熔毁释出的人造放射性核种。这些核废水如果没有经过净化处置，水中放射性物质的浓度绝对会超过安全标准。若想降低水中放射性物质浓度，就只有（1）加水稀释或（2）从水中取出放射性物质，这两种方法而已。换成国中理化课本的说法，核废水是溶液，水是溶剂，放射性物质是溶质，增加溶剂或萃取出溶质，这都是降低溶液浓度的方法。

福岛第一核电厂内的核废水，汲取上岸后需要经过“铯吸附装置”、“ALPS多核种除去设备”进行净化处理，成为“ALPS处理水”，这些步骤都是“从水中取出放射性物质”、降低水中放射性核种浓度的方法。然而，不论现在福岛第一核电厂内有多少设备、设备的效果有多好，都还不足以对付核废水中的氚。原因无他，具有放射性的氚是氢的同位素，氢是构成水分子的元素，水中本来就有氚，要将同位素分离开来，就需要耗费更高的成本与技术，还不一定能完全分离出来，顶多只能改变浓度。

一般核电厂（也就是没有发生核电厂事故的一般核电厂）的核废水中就含有氚，一般情况并不会特别检视核电厂废水中的氚浓度。一方面是氚的半衰期只有12年，再加上自然环境中本来就有氚，虽然各国对于水中氚浓度的排放标准不一，但各国对于水中氚的容许值（接受度）很大，一般核电厂排放的核废水不太容易因为氚浓度太高而被禁止排放。

但福岛第一核电厂不一样，它是发生事故（炉心熔毁）的核电厂，所以需要特别检视废水中的放射性物质浓度，在检测核废水放射性物质的浓度时，就会包括氚。是否该将福岛第一核电厂核废水中的氚和其他放射性核种分开来看，就成了尴尬的问题。





2023年8月24日，一名示威者在东京电力公司总部前举行集会，反对日本计划将福岛第一核电站处理后的放射性水排入海洋。摄：Kim Kyung-HoonReuters/达志影像

福岛第一核电站的核废水不是只有氚

近期网路上出现许多比较——邻近亚洲国家核电站排放的核废水当中，氚浓度比福岛第一核电站的ALPS处理水中的氚浓度高多少——甚至还有[多家日本媒体](#)大篇幅[报导](#)国外核电站排放的废水当中，氚年排量比福岛第一核电站排放标准的高了多少。

[例如](#)，福岛第一核电站核废水目前的排放计划是氚的年排量不超过22兆贝克，韩国的月城核电站2021年氚排量达71兆贝克、中国秦山第三核电站2020年氚排量达143兆贝克、英国塞拉菲尔德（Sellafield）核废料再处理厂2020年氚排量达186兆贝克、加拿大布鲁斯（Bruce）A、B核电厂2021年氚排量达1,190兆贝克、法国拉阿格（La Hague）核废料再处理厂在2021年的氚排量达1京（即10的16次方，兆的一万倍）贝克……这些报导内容点出氚的年排量比福岛第一核电站目前规划的年排放总量还要高的核电站相关设施大有人在，和其他国相比，福岛第一核电站的氚排量根本小巫见大巫。

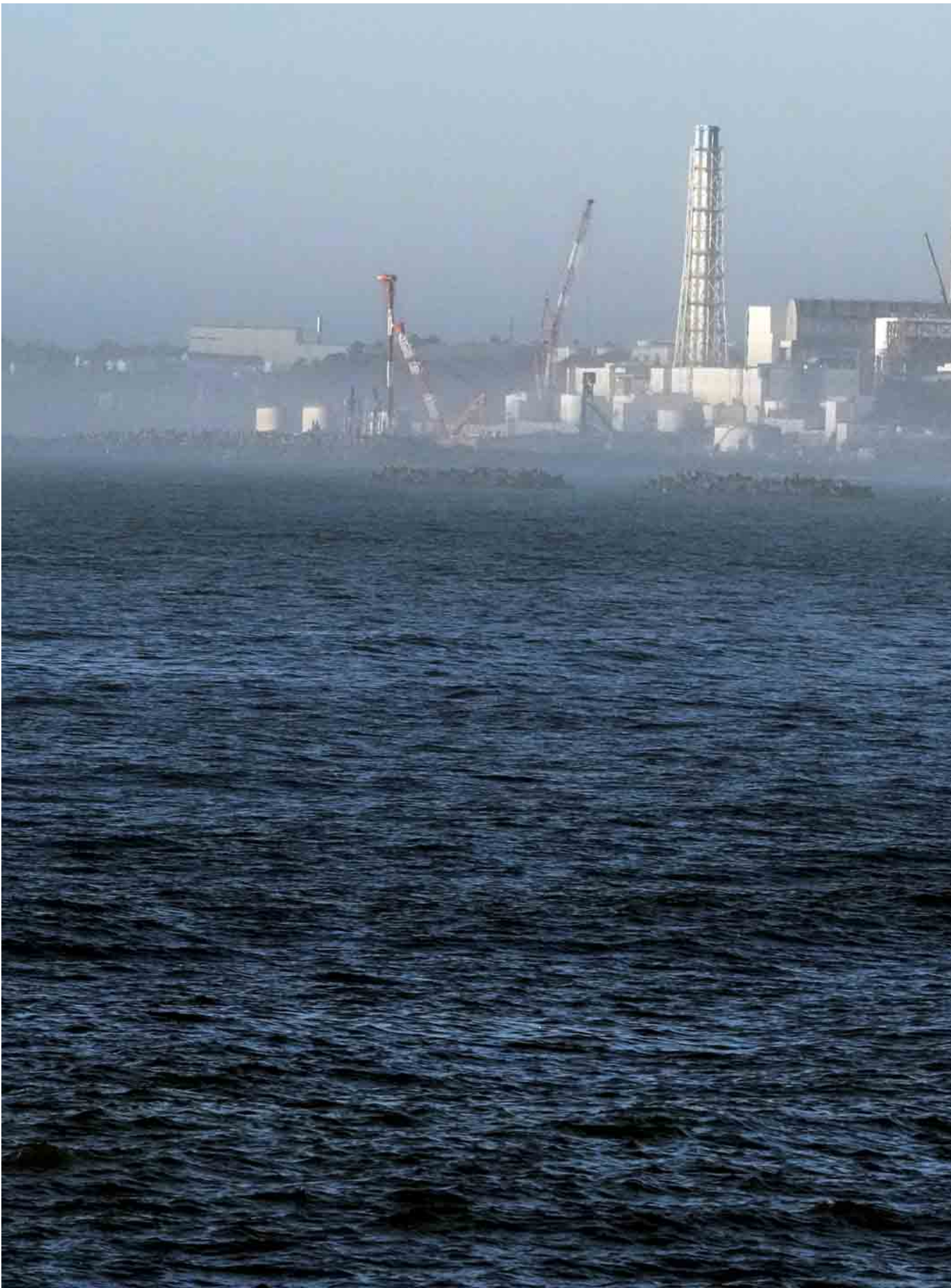
然而，这些报导内容其实都忽略了福岛第一核电站是发生了事故的核电站，因此福岛第一核电站的核废水中的放射性核种不是只有氚，福岛第一核电站的核废水还包括了炉心熔毁释出的其他人造放射性核种。除了氚浓度之外，排放前、后都需要监测其他放射性核种的浓度，以及排放后对环境的影响。

因应核废水排海方案已成定局，日本水产厅自去（2022）年起，都会定期在福岛第一核电站排海管线附近捕鱼检测鱼肉体内放射性物质的浓度（检验鱼种以当天捕捞到的渔获为准）。水产厅的检验报告分成两种，一种是因应核废水排海推出的“迅速分析”，迅速分析只有针对鱼体内的氚浓度进行检测，取样范围为福岛第一核电站半径10公里内海域，检验结果必须在隔天或后天公布，但仪器侦测极限只到每公斤10贝克，数值再低就验不出来；另一种耗时较长（检验时间耗时1.5个月）的“精密分析”，会检测除了氚浓度之外的铯浓度，[仪器侦测极限可达每公斤0.408贝克](#)。

本文截稿前，水产厅公布的最新版精密分析报告 [（2023年7月3日版）](#) 显示，自去年（2022）6月定期检验以来，福岛第一核电站附近海域捕到的鱼类，体内氚浓度与铯浓度都是“未检出”，也就是浓度低于仪器可以检验出的读值（每公斤0.408贝克）。水产厅的精密分析需要检验鱼体内放射性同位素铯的浓度，正是因为意识到福岛第一核电站是发生事故的核电站，氚以外的放射性物质对环境的危害也很重要。

回到福岛第一核电站核废水的氚浓度问题，就结论来说，福岛第一核电站的核废水，从存放在厂区内巨型水槽的状态，迈向最终处置之前的前置作业，就分成两派：一派认为，氚本来就是自然界中常见的放射性核种，它对于自然界的影响很小，只要符合目前各国的水中氚浓度标准，按照一般流程处置就好；另一派则认为，现在讨论的氚是发生核电厂事故的福岛第一核电站的核废水，如果可以降低水中氚浓度，当然是降得越低越好。





2023年8月24日，从日本东北部浪江镇附近的渔港可看到福岛第一核电站。摄：Eugene Hoshiko/AP/达志影像

所以核废水的最终处置方案，除了前面提到的陆、海、空，还可以再搭配是否要将氚进行前置处理，而有更多可能的组合方式。

“加水稀释水中氚浓度”就是目前日本采用的方法：福岛第一核电厂的核废水（精确来说应为ALPS处理水）在排海之前，会先和海水进行混合、稀释，确保氚浓度降到每公升1,500贝克以下，才能进到海底管线排入大海。加水稀释的好处是，核废水整体的放射性物质浓度比较低，对环境的负担会小一点，但它的缺点是，加水稀释后整体体积会变大：如果使用相同的管线、相同的流速进行排放，有没有先加水稀释核废水浓度，会影响到完全排放完毕所需要的时间。

至于从水中取出氚的方法，不是没有，但这么做会遇到更多难题。一个是成本考量，另一个则是降低核废水中的氚含量后，势必会产生出单位浓度更高的含氚废弃物（这是质量守恒定律）。这个氚浓度更高的废弃物又该如何处理？这好像陷入了无限回圈，想解决一个问题，但想出来的方法却出现了更多待解问题。

## 早期提出5大最终处置方案

有了前面这些背景，终于可以来谈当时曾经讨论过的核废水最终处置方案有哪些：

# 日本早期曾提出的福島核廢水 5大最終處置方案

		是否對氙進行前置處理	× 否    △ 稀釋    ○ 分離
			成本（億日圓）*以最高估計成本繪製
陸	以水的狀態注入地層	×	<div>177-180</div> <div>*不含事前地層調查與日後觀測地層狀況的費用</div>
		△	<div></div> <div>*不含事前地層調查的費用</div>
		○	<div>178-181</div> <div>*不含事前地層調查與分離同位素的費用</div>
	固化處理後埋入地層	×	<div>745-2000</div>
海	排入海洋	△	<div>17-34</div> <div>日本目前採用</div>
		○	<div>10-11</div> <div>*不含分離同位素的費用</div>
空	以水蒸氣的狀態釋出	×	<div>227-349</div>
		○	<div>227-349</div> <div>*不含分離同位素的費用</div>
	電解水，轉換成氫氣後釋出	×	<div>600-1000</div>
		○	<div>600-1000</div> <div>*不含分離同位素的費用</div>

註：分離同位素的費用當時無法估算，故以虛線呈現未計入的可能成本。

資料來源：三菱綜合研究所參考日本經濟產業省資源能源廳資料整理而成



由上表可知，[2016年评估阶段时](#)，完全无法计算将核废水中的氙分离出来的成本。不过当时的讨论有谈到，如果顺利将氙从核废水当中分离出来，剩下的高浓度含氙废弃物就是要找个地方放，但这又会回到福岛第一核电厂区内到底还有多少空间可以存放辐射废弃物的问题。

撇开成本考量，[日本政府在2013-2016年间讨论的陆、海、空共5种方案当中](#)，陆和空有一个比排海方案更大的共同问题——难以监测。如果将“核废水最终处置方法”视为一个工程问题的话，除了事前评估之外，一旦确立的这个方法，这个方法日后该如何定期监测它对环境的影响，也是考量因素之一。

“注入地层方案”，最大的问题就是难以预测这对地层会有多大的影响。当时评估是要注入地表下2,500公尺深处，距离地表如此之远，在地表上的人们是如何监测地底下的状况？虽然深度不能类比，人类超抽地下水都会造成地层下陷了，现在是要反过来将水注入地层，而且还是总量[超过100万立方公尺的废水](#)，即便是以相当缓慢的流量注入，还是很难相信这么做不会对地层造成负面影响，而且现时也没有可以监测核废水“注入地层”后对地层影响的监测方法。





2023年8月23日，韩国首尔，示威者抗议日本决定将福岛核电站处理后的废水排入太平洋。摄：Seongjoon Cho/Bloomberg via Getty Images

“陆”系列方案另有一个“固化后埋入地层方案”，在日本专案小组讨论过程中不了了之，原因是没有前例可循。在日本政府选定排海方案后，部分环团希望可以改选固化方案，固化后不一定要埋入地层，也能在地面上找块空地存放。固化方案的几个问题点是：核废水在固化过程中，很可能会有部分逸散到大气之中，这在监测上会有难度；而在固化处理后，它是否能够以这种形式永久存放？是否有可能在数年之后逐渐溶出放射性物质？要如何定期监测固化处理后的核废水是否会对存放地点造成危害？

此外，将核废水进行固化处理后，它的体积变化又是如何？如今解决核废水的紧迫性，就在于福岛第一核电厂厂区内没有足够存储空间的事实。如果核废水经固化处理后的体积没有缩减太多，还是得面临寻找地方存放的问题，如此一来又回到一切问题的源头。在日本专案小组讨论过程中，五案后来只剩“排海”和“水蒸气”方案，是因为只有这两例有先例可循。

至于电解成水再以氢气方式释出，这中间需要耗费电力，电解后排放出去的氢气当中也会含有氚气。另外，核废水在电解过程中，氚以外的放射性物质又会有什么样的变化？是否会跟著释出？也是个问题。但更重要的是，将核废水以水蒸气的形式释放到大气中，或是电解成水再以氢气形式释出，都会[面临监测难题](#)。

核废水排海之后，虽然也是会向外扩散，但至少在海上各地设置监测站，都比在空中设置测站容易。除了监测外，排到大气中也会需要考虑对空中生物的影响，以及将水气排到大气后，放射性物质是否又会落在地面上？如此一来，日本政府耗费多年在福岛进行的除辐射污染工作，是否要再来一遍？

就结果论来说，当初专家小组提的5个方案，最终剩下“以水蒸气形式在大气中释出”以及“排海方案”这两案。两案的差别在于，排海方案会受影响的就是渔业，但大气释出方案，很可能广泛造成住在陆面上的居民恐慌，也可能会影响到林业。日本政府选择排海方案的理由是，日本过去处理核废水的方式只有排海，而没有试过换成水蒸气释出大气的作法。即便[外国](#)曾经有过将核废水以水蒸气形式在大气释出的案例，当时的规模没有这么大，日本也没有类似经验。所以两者相较之下，排海方案成了日本最容易上手，也是有最完整规范的选项。





2023年8月24日，一名渔民在日本福岛县相马市的松川浦渔港工作。摄：Kyodo/via Reuters/达志影像

## “眼不见为净”，才是主要考虑？

对于日本政府来说，日本政府急著要将福岛第一核电厂厂区内的核废水处理掉，或者说是找出最终处置方法，一个很大的因素是“观感不佳”。福岛第一核电厂内存放的巨型水槽，成了“看得见”的大型垃圾，不管是新闻画面空拍照，甚至是Google Map的卫星地图，都能看到一桶又一桶的巨型水槽排满整个厂区的闲置土地。如果能减少福岛第一核电厂内的水槽数量，“看得见的减少”就成了福岛第一核电厂确实有一步步朝著除役（decommission）之路迈进的具象化证明。

实际上，日本政府也确实将福岛第一核电厂的核废水问题与核电厂除役、福岛复兴绑在一起。[日本政府的论述是](#)，为了复兴福岛，福岛第一核电厂除役工作势在必行，核电厂的除役工作需要空间处置高阶废弃物，作为日后核电厂除役的高阶废弃物处置地点，所以不能再增加更多巨型水槽，“为了除役与复兴，处理ALPS处理水问题是绝对必要的”。

然而，找出核废水最终处置方案并不代表核电厂除役工作前进一大步。福岛第一核电厂的除役工作，最困难的步骤就是取出1-3号机组炉心熔毁的核废料，这一关解决之后，后续的核电厂除役工作就和一般核电厂的除役工作并无不同。在尚未找出取出这些炉心熔毁的核废料的方法之前，福岛第一核电厂的除役工作都不能说是往前迈进一大步。现在连取出这些炉心熔毁核废料的可行方法都没有，就急著空出一块地存放这些取出后的高阶核废料，这中间跳了很多步。

实际上，虽然福岛第一核电厂园区的空间不够，但由于其周边仍是禁止一般民众进出的归还困难区域，征收这些土地作为存放用途不无可能。再加上对于排海方案的疑虑，因此部分反对排放核废水的环团主张，在找出更好的解决方案之前，应该继续维持在陆面上存放核废水，但日本政府无意为此扩大核废水的储存空间。同时，日本政府不愿采纳环团后续提出的固化处理的方案，也可能因为，即便将核废水从液体变成固态，它还是肉眼“看得见的”。

或许，核废水最终处置方案的问题，打从一开始就是要“眼不见为净”。排海方案满足了这个需求，同时也是成本最低、又最能有效监测排放前后浓度变化的方案，让它成为日本政府心中的最佳解。

但这并不代表日本政府的决策过程、风险沟通上并没有问题。日本政府曾经承诺福岛在地渔民，如果没有获得渔民谅解，就不会排海，但日本政府最终并未遵守承诺。与此同时，日本政府虽然找来国际原子能总署（IAEA）背书，但这不代表尽到风险沟通的责任。日本政府“独排众议”，拍板在8月24日排放放射性物质浓度符合标准的ALPS处理水，很可能在日后成为风险沟通的负面教材。

[#日本核废水排海](#) [#核废水](#) [#福岛](#) [#福岛核灾](#) [#核电](#) [#评论](#)

本刊载内容版权为端传媒或相关单位所有，未经[端传媒编辑部](#)授权，请勿转载或复制，否则即为侵权。

端傳媒八週年 | 另一個世界仍然有可能

訂閱端傳媒，期待改變的你，  
與亟待突破的我們，共同撐起另一個世界。

8週年尊享會員 特別優惠 20%OFF

立即訂閱 →

端傳媒的下一程，需要你的守護。今天就成為訂閱會員，支持我們走下去，支持華文世界不可或缺的深度報導和多元聲音。點擊了解更多[會員計畫](#)