

學術論文

日本核電發展的經驗與挑戰

The Experience and Challenges of Japan's Nuclear Power Development

郭昕光 *Hsin-kuang Kuo*
國立政治大學外交學系副教授
Associate Professor of Department of Diplomacy
National Chengchi University

摘要 / Abstract

核電是一項需要長期投入卻又容易因為社會觀念改變而承受壓力的技術。2011年3月11日福島(Fukushima)核事故爆發後，部分國家毅然決定廢棄核電。反觀身為事故直接受害者的日本，卻並未告別核電。從表面上看，過去十年日本似乎已經吸取了教訓並做出改變。不過，2011年之前的願景，仍然持續發揮影響，日本政府的基本立場並未根本動搖。雖然日本聲稱將盡可能減少對核電的依賴，但仍將核電作為基本負載電源，甚且以2030年核電在供電組合比重20~22%為目標。在國內民眾的強烈反對下，日本為何堅持保留這項甚具爭議的能源？當前日本核能發電的狀況為何？未來政策目標又能否實現？福島核事故已逾十載，本文擬就上述問題，梳理日本核電發展的演進與未來展望。

Nuclear power is a technology that requires long-term commitment, but is vulnerable to pressure due to changes in social concepts. In the wake of the Fukushima nuclear accident on March 11, 2011, some countries decided to

phase out nuclear power. However, as the direct victim of the accident, Japan did not say goodbye to nuclear power. On the surface, Japan seems to have learned a tough lesson and made a number of changes to its policy in the past decade. Yet the government and nuclear industry have hardly changed attitudes towards nuclear power. While Japan claims to reduce its dependence on nuclear power as much as possible, it maintains nuclear power as a baseload electricity source. And Japan is still aiming for a nuclear power share of 20–22 % by 2030. Why does Japan insist on retaining this controversial energy source? What is the current situation of Japan's nuclear power? Can future policy goals be achieved? On the tenth anniversary of the Fukushima accident, this article intends to analyze the essence and evolution of Japan's nuclear power development.

關鍵詞：日本、福島核災、核電、核能

Keywords: Japan, Fukushima Daiichi nuclear disaster, Nuclear power, Nuclear energy

壹、前言

2011 年 3 月 11 日一場芮式規模 (Richter scale) 9.0 級的大地震襲擊日本東北部 (Great East Japan Earthquake)，引發的海嘯造成福島第一核電廠 (Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant) 反應爐冷卻系統失靈，爐心熔毀。¹ 這場意外是自 1986 年車諾比 (Chernobyl) 核洩漏事件以來最嚴重的災難。² 事故發生後，日本陸續關閉所有核子反應爐，核能發電量因此銳減。當時的民主黨 (Democratic Party of Japan, DPJ) 政府一度聲稱將淘汰所有商業核電計畫，³ 但 2012 年底上台的安倍晉三 (Shinzo Abe) 政府卻決定重啟核電。⁴ 依據經濟產業省 (Ministry of Economy, Trade and Industry) 2015 年推出的《2030 電力組合》(2030 Electricity Mix)，核電在日本電力結構中的比例，預計將於 2030 年回升至 20~22%。⁵ 2018 年公布的第五次「能源戰略計畫」(Strategic Energy Plan, SEP) 指出，日本未來將盡可能減少對核能的依賴，但也強調核能仍是必要的基載電源。⁶ 2021 年 7 月 17 日，第六次能源戰略計畫草案出爐，儘管事前各方有不同期待，不過仍然維持前述目標不變。⁷

¹ 該起地震是日本有史以來最強烈的地震，也是自 1900 年進行現代測量以來全球第三大地震。

² 福島事故在國際核事件分級表中被列為最嚴重的 7 級，與 1986 年的車諾比 (Chernobyl) 核災是史上僅有的 2 次屬分級表中最嚴重的 7 級程度事件。

³ David Cyranoski, "Japan considers nuclear-free future," *Nature*, Vol. 486, No. 7401 (June 7 2012), p. 15.

⁴ David Cyranoski, "Japan caught up in energy dilemma," *Nature*, Vol. 507, No. 7490 (March 6, 2014), pp. 16-17.

⁵ "Long-term Energy Supply and Demand Outlook," *Ministry of Economy, Trade and Industry*, July 16, 2015, https://www.meti.go.jp/english/press/2015/pdf/0716_01a.pdf.

⁶ "Strategic Energy Plan," *Ministry of Economy, Trade and Industry*, July 2018, https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/others/basic_plan/5th/pdf/strategic_energy_plan.pdf.

⁷ 該草案由經濟產業省提出，在獲得內閣批准之前，仍須經過審查，包括為期一個月的公眾評論。根據草案內容，預計 2030 年可再生能源將占日本電力組合的 36-38%，核能

核能是一項需要長期承諾，但又容易因為社會觀念改變而承受壓力的技術。福島事故震驚全球，包括德國、瑞士與義大利等國，紛紛決定廢棄核電。反觀身為事故直接受害者的日本，卻並未徹底告別核電。從表面上看，日本似乎已經吸取了教訓並做出改變。不過，2011年之前的願景，仍然影響著日本，政府的基本立場並未根本動搖。在國內民眾的強烈反對下，日本為何堅持保留這項甚具爭議的能源？日本核電當前處境為何？未來政策目標又能否實現？適逢福島事故十週年，本文擬就上述問題，綜合分析日本核能政策的演進與未來展望。以下內容分三部分進行，首先簡述日本核電開發的歷史與概況，其次分析日本核能政策的形成與演進，最後綜合歸納當前日本核電面臨的挑戰與未來展望。

貳、日本核電發展的歷史與概況

廣義而言，擁有發展核電所需的技術與知識的國家，可簡單區分為堅決反對、堅定支持、和由盛轉衰三種類型。堅決反對核能的國家如挪威和澳大利亞，堅定支持的國家以法國為代表，而由盛轉衰的國家則如美國和加拿大，也包括台灣。至於日本，在福島事故爆發前，無疑是核能的忠實擁護者。

1953年12月8日，美國總統艾森豪（Dwight Eisenhower）在聯合國演說中，呼籲各國合作發展「原子能和平用途」（Atoms for Peace）。⁸ 艾森豪宣稱「從原子能中獲得和平的力量不是空洞的夢想。此時此地，這項能力已經被證實」、「美國將鼓勵全世界一起鑽研和平有效地利用可裂變

20-22%，代表非化石燃料將占電力供應的56-60%。Ritsuko Shimizu & Yuka Obayashi, "Japan boosts renewable energy target for 2030 energy mix," *Reuters*, July 21, 2021, <https://www.reuters.com/business/energy/japan-boosts-renewable-energy-target-2030-energy-mix-2021-07-21/>。

⁸ Leonard Weiss, "Atoms for Peace," *Bulletin of the Atomic Scientists*, November 1, 2003, <https://thebulletin.org/2003/11/atoms-for-peace/>.

物質的方法。」⁹ 為了推廣該項理念，美國意識到若能促成世界上唯一遭受過原子彈轟炸的日本加入，將別具象徵意義。正如美國原子能委員會（U.S. Atomic Energy Commission）委員托馬斯·默里（Thomas Murray）的直言不諱，「雖然發生在廣島（Hiroshima）和長崎（Nagasaki）的事件尚未遠離，但在日本建造核能電廠，會是一種戲劇性的基督教精神的展現，可以讓我們遠離屠害那些城市的記憶。」¹⁰ 華盛頓郵報（Washington Post）也刊文呼應，認為「許多美國人現在意識到向日本投擲原子彈是沒有必要的。若要彌補美國的所作所為，消除亞洲人認為美國將東方人視為炮灰的印象，最好的手段就是提供日本和平利用原子能的技術。」¹¹ 雖然日本面對核能有著非常複雜的感受，但最終還是在美國的鼓吹下，加入了和平使用原子能的陣營。¹² 以下分別從法規制度、研發應用與福島事故的衝擊，說明日本核電發展的經過與近況。

一、法規與制度

1954 年，日本政府首先撥用 2.3 億日圓（相當於 65 萬美金），投入核能研發計畫。¹³ 翌年，美日兩國簽署共同研究核能和平用途的協議。緊接著，1955 年 12 月 19 日，日本通過《原子力基本法》（Atomic Energy Basic

⁹ 演說全文可參閱以下網站：

<https://www.americanrhetoric.com/speeches/dwightdeisenhoweratomsforpeace.html>。

¹⁰ Yuri Tanaka & Peter Kuznick, "Japan, the Atomic Bomb, and the 'Peaceful Uses of Nuclear Power'," *The Asia-Pacific Journal*, Vol. 9, Issue. 18, No. 1(May 2 2011), <https://apjjf.org/-Peter-J--Kuznick--Yuki-Tanaka/3521/article.pdf>.

¹¹ Peter Kuznick, "Japan's Nuclear History in Perspective: Eisenhower and Atoms for War and Peace," *Bulletin of the Atomic Scientists*, April 13, 2011, <https://thebulletin.org/2011/04/japans-nuclear-history-in-perspective-eisenhower-and-atoms-for-war-and-peace-2/>.

¹² Benjamin K. Sovacool & Scott Victor Valentine, *The National Politics of Nuclear Power: Economics, Security, and Governance* (London: Routledge, 2012), pp. 107-110.

¹³ "Nuclear Power in Japan," *World Nuclear Association*, <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-power.aspx>.

Law) , 並依據該法於 1956 年 1 月 1 日成立「原子力委員會」(Japan Atomic Energy Commission, JAEC) , 負責政策規劃。¹⁴ 其他依法成立的組織還包括主持技術開發的「科學技術情報中心」(Japan Information Center of Science and Technology, JICST) 、¹⁵ 「日本原子力研究所」(Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI) 和「原子燃料公社」(Atomic Fuel Corporation) 等。另由通商產業省 (Ministry of International Trade and Industry, MITI) 負責管理核電事業單位。至於監管核能安全的「原子力安全委員會」(Nuclear Safety Commission, NSC) , 則於 1978 年單獨成立。

16

2001 年日本中央省廳重組, 原子力委員會轉為諮詢機構, 改隸內閣府。¹⁷ 包括核電在內的整體能源政策, 由經濟產業省所屬之「自然資源與能源廳」(Agency for Natural Resources and Energy) 負責規劃。在監管工作方面, 經濟產業省增設「原子力安全保安院」(Nuclear and Industrial Safety Agency, NISA) , 監督核能設施的安全。先前的原子力安全委員會則負責審查監管機構進行的安全檢查。¹⁸ 2005 年, 日本原子力研究所和前身為原子燃料公社的「日本核燃料循環開發研究所」(Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC) 合併, ¹⁹ 成立「日本原子力研究開發機構」(Japan Atomic Energy Agency, JAEA) , 隸屬文部科學省 (Ministry of

¹⁴ 相關資訊可參閱原子力委員會官方網頁: http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/index_e.htm。

¹⁵ 科學技術情報中心是現今日本科學技術局(Japan Science and Technology Agency, JST)的前身。

¹⁶ “Nuclear Power in Japan,” *World Nuclear Association*.

¹⁷ 隨著日本社會面臨變革, 基於對未來國內外形勢的展望, 原子能委員會於 2004 年 6 月另成立了「新核能政策規劃委員會」, 成員不僅包括核能領域的權威專家, 還納入學術界、企業界、地方政府、大眾媒體和非政府組織等各領域的領導人和專業人士。原子能委員會的任務隨著日本核能計畫的發展而修訂, 最新依據是 2014 年 12 月 16 日通過的《日本原子能委員會成立修正案》。

¹⁸ 相關資訊可參閱經濟產業省官方網頁, <https://www.meti.go.jp/english/index.html>。

¹⁹ 1967 年「原子燃料公社」改組更名為「動力爐・核燃料開發事業團」(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, PNC) , 1998 年再次改組為「日本核燃料循環開發研究所」(Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC) 。

Education, Culture, Sports, Science and Technology），是日本國內最主要的核能研究單位。²⁰

1955 年《原子力基本法》嚴格規範，日本的核能研發與利用僅限於和平用途。在安全優先的前提下，以保障能源資源，促進科學研究與產業發展，進而提高國民生活水準為宗旨。為了有系統地實現上述目標，原子力委員會自 1956 年起至 2000 年，每 5 至 7 年發布一次「核能研究、開發和利用長期計畫」（Long-term Program for the Research, Development and Utilization of Nuclear Energy, LTP），連同 2005 年公布的「核能政策框架」（Framework for Nuclear Energy Policy），以及由經濟產業省自 2003 年開始規劃的「能源戰略計畫」（Strategic Energy Plan, SEP），是事業單位與相關機構在開展各項核能建設與研發工作時的指引。能源戰略計畫每三年修訂一次，最新一次也是第六次計畫的草案，已於 2021 年 7 月 17 日公布。

21

二、研發與建設

日本首座商業用核子反應爐「東海 1 號」（Tokai-1）係從英國進口的鎂諾克斯反應爐（Magnox），1966 年 7 月投入運轉，電容量 166 MWe。²²此後日本電力事業單位轉向與美國供應商合作，由美商通用電氣（General Electric Company）和西屋電氣（Westinghouse Electric Corporation）售予技術，日方承攬建造。1970 年，首批三座輕水式反應爐（light water reactor,

²⁰ JAEA 於 2015 年更名為「日本原子能廳國立研究開發所」（National Research and Development Institute Japan Atomic Energy Agency）。

²¹ 能源戰略計畫自 2003 年第一次推出後，依序在 2007、2010、2014、2018 更新發布，最近一次計畫於 2021 年 7 月 17 日公告。根據該計劃，日本能源政策原則係基於 3E+S，即在安全（Safety）的前提下，確保能源的穩定供應（Energy Security），經濟效率（Economic Efficiency）和兼顧環境保護（Environment）。

²² 日本第一座核子反應爐為「日本電力示範反應爐」（Japan Power Demonstration Reactor, JPDR），於 1963 開始運轉，1976 年關閉，不僅提供商業用反應爐大量資訊，也開啟日後反應爐的除役技術。至於「東海 1 號」業已於 1998 年 3 月關閉。

LWR) 正式商轉。²³ 在進一步獲得美方授權許可後，至 1970 年代末，包括日立 (Hitachi)、東芝 (Toshiba) 和三菱重工 (Mitsubishi Heavy Industry) 等公司，已具備相當程度的核電技術和工程建造的能力。

由於早期核子反應爐的歲修工作需要長時間停機，平均容量因數 (Capacity factor) 因此偏低。²⁴ 為了提升電廠的使用效益，通商產業省 (Ministry of International Trade and Industry) 結合產業界，自 1975 年起展開「輕水反應爐改進暨標準化計畫」(LWR Improvement and Standardization Program)。同時間，東芝、日立和美國通用電氣也進一步加強合作，完成新一代「進步型沸水式反應爐」(Advanced Boiling Water Reactor, ABWR) 的設計。²⁵ 1996 年，日本如期於 3 年內按經費預算，在柏崎刈羽 (Kashiwazaki-Kariwa) 建造完成第一批 ABWR。日本的核電技術實力從此更上層樓，不僅應用在國內市場，也包括海外地區。²⁶ 2010 年，日本核電規模已達高峰，共有 54 座核子反應爐，發電量 48,847 MWe，是僅次於美、法兩國，全球第 3 大核電產國，核發電量占全國電力供應的比例達 25%。2010 年，經濟產業省公布第三次「能源戰略計畫」，擬再大舉增建設施，預計核電在總電力供給的占比，將於 2030 年增加至 53%，2050 年更提高到 70%。²⁷ 足見當時日本政府對於核能的未來貢獻，極為看重。

除了廣設核能電廠外，日本亦不遺餘力地投入技術研發。由於日本缺乏鈾礦，為降低對進口鈾的依賴，同時發揮鈾燃料的最大效益並減少高放

²³ 核子反應爐有多種設計類型，包括輕水式 (light water reactor)、重水式 (heavy water reactor)、高溫氣冷式 (high temperature gas reactor)、快速增殖 (fast breeder reactor) 等反應爐。輕水式反應爐又分沸水式 (boiling water reactor, BRW) 和反壓水式 (pressured water reactor, PRW) 兩種，日本共有 30 座沸水式和 24 座反壓水式反應爐。

²⁴ 容量因數代表發電設備的穩定性，平均年度容量因數越高表示越穩定。核電廠若 24 小時以滿載額定容量運行，容量因子為 1。停機維修時，容量因子便是 0。

²⁵ 進步型沸水式反應爐在反應爐設計、安全系統、儀控系統、輻射防護、廢料減量等各方面都較前一代有長足進步，電容量 1350 MWe，使用壽命長達 60 年。

²⁶ 台灣第四核能發電廠為日本以外第一個使用 ABWR 設計的新一代核能發電廠。

²⁷ “The Strategic Energy Plan of Japan 2010,” *Ministry of Economy, Trade and Industry*, June 2010, https://www.jetro.go.jp/mexico/topics/20100708514-topics/01_ANRE_METI.pdf.

射性廢棄物的數量，日本早在 1970 年代便決心發展封閉式核燃料循環系統，包括使用過核燃料的再處理、²⁸ 混合氧化物燃料（mixed-oxide fuel, MOX）的生產，²⁹ 以及「快增殖反應爐」（fast breeder reactor, FBR）的研發等。³⁰ 2007 年 4 月，日本與美國簽署了一項「核能聯合行動雙邊協議」（United States-Japan Joint Nuclear Energy Action Plan），建立兩國共同研發核能技術的合作框架。根據該計畫，美國和日本將對快增殖反應爐、核燃料循環系統、中小型反應爐以及核廢料管理等項目進行共同研究。³¹ 日本也另與法國、加拿大、中國大陸、和英國等國，簽訂各類技術合作協議。

三、衝擊與改變

2011 年 3 月 11 日下午 2：46 日本東北地區發生劇烈地震，後續引發的一連串海嘯淹沒了數百平方公里的海岸線。東京電力公司（Tokyo Electric Power Company, TEPCO）福島第一核電廠（Fukushima Daiichi）1、2 和 3 號機組，在地震發生時迅速有效地按設計關閉。然而 50 分鐘後，海嘯侵襲核電廠，破壞了所有電力系統。由於冷卻迴路失去電力，數日後爐內燃料熔毀，大量氫氣釋放，導致 4 號機組發生爆炸。核島事故發生後，

²⁸ 使用過核燃料的再處理是一種化學過程，可從使用過核燃料中回收鈾和可重複使用的鈾，並將放射性廢物分離成更易於管理的形式。日本核燃料有限公司（JNFL）在日本北部青森縣六所村的後處理廠，已於 2018 年啟動商業營運。

²⁹ 核燃料的循環利用主要有兩種方式：一是將所提取的鈾燃料混入鈾燃料，製成鈾鈾混合氧化物燃料（MOX 燃料），然後用於鈾熱中子反應爐發電；另一方法是將提取的鈾燃料直接用於快中子增殖反應爐進行發電。

³⁰ 日本第一座商轉的快增殖反應爐「文殊」（Monju）於 1994 年開始運轉，但不到一年就因發生高溫液態鈉外洩事件而停機。在歷經長達十餘年的修復、調查、重啟，又再次停機後，2016 年決定除役。Osamu Tsukimori & Aaron Sheldrick, “Japan pulls plug on Monju, ending \$8.5 billion nuclear self-sufficiency push,” *Reuters*, December 21, 2016, <https://www.reuters.com/article/us-japan-nuclear-monju-idUSKBN14A0UX>。

³¹ “United States and Japan Sign Joint Nuclear Energy Action Plan to Promote Nuclear Energy Cooperation,” *U.S. Department of Energy*, April 25, 2007, <https://www.energy.gov/articles/united-states-and-japan-sign-joint-nuclear-energy-action-plan-promote-nuclear-energy>。

所有核電廠奉令停機檢查，由民主黨（Democratic Party of Japan, DPJ）的首相菅直人（Kan Naoto）領導的政府開始重新檢討能源政策。2011年7月，內閣辦公室成立「能源與環境委員會」（Energy & Environment Council, EEC）。經過數月的調查與審議，委員會於2012年9月公布「能源與環境革新戰略」（Innovative Energy and Environment Strategy），宣布日本將於2030年達成非核家園的目標。³² 2012年9月，環境省（Ministry of the Environment）另設獨立行政法人「原子力規制委員會」（Nuclear Regulation Authority, NRA），以取代災後飽受各界強力詬病的原子力安全委員會和原子力安全保安院兩個組織。

2012年底，國會改選，自民黨（Liberal Democratic Party, LDP）取得絕對勝利。新政府上台後，立即廢除成立不久的能源與環境委員會。首相安倍晉三（Shinzo Abe）在2013新年談話中表示，將在三年內重啟所有核子反應爐。³³ 2014年經濟產業省公布第四次能源戰略計畫，也明確指出將重建核電，並將核能定位為穩定電力供給的重要「基載電源」（baseload power）。³⁴ 2015年7月，經濟產業省發布「長期能源供需展望」（Long-term Energy Supply and Demand Outlook），預計2030年核能在初級能源供應比重為10-11%，在電力結構的占比則為20~22%。³⁵ 2018年第五次能源戰略計畫重申相同目標。因應巴黎協定（Paris Agreement）要求各國自行研擬溫室氣體排放之長期戰略，2020年12月25日，經濟產業省公布「綠色

³² Yasuchika Hasegawa, "On the Release of the Innovative Energy and Environment Strategy," *Keizai Doyukai*, September 14, 2012, <https://www.doyukai.or.jp/en/chairmansmsg/articles/yhasegawa/pdf/120914a.pdf>.

³³ "Press Conference by Prime Minister Shinzo Abe," *Cabinet Public Relations Office*, January 4, 2013, http://japan.kantei.go.jp/96_abe/statement/201301/04kaiken_e.html.

³⁴ 日本於2014年4月11日公布的「第4次能源戰略計畫」，旨在建構「多層化與多樣化的彈性能源供需結構」。計畫內容包括重建核能、加速導入再生能源、提升火力發電效率、改進電力及天然氣供應結構等。

³⁵ "Long-term Energy Supply and Demand Outlook," *Ministry of Economy, Trade and Industry*, July 16, 2015, https://www.meti.go.jp/english/press/2015/pdf/0716_01a.pdf.

成長戰略」(Green Growth Strategy)，將核電列為 14 項重點領域之一，以完成 2050 年實現碳中和 (Carbon Neutrality 2050) 的目標。³⁶ 2021 年 7 月 17 日第六次能源戰略計畫草案出爐，有關核能部分，政府再度維持與先前一致的規劃。

由於福島事故後，各個電廠陸續關閉反應爐機組，核電廠年平均使用率劇降。自 2013 年 9 月 15 日起，日本更開始了長達 1 年 11 個月零核電的狀態。³⁷ 雖然安倍晉三政府支持核電重建，但反應爐重啟必須符合原子力規制委員會 2013 年 7 月公告的新管制要求 (New Regulatory Requirements)。³⁸ 在考量設備升級成本超過關閉成本，15 座反應爐決定除役。連同福島第一核電廠 6 部機組，以及原先已展開除役作業的東海核電廠和濱岡 (Hamaoka) 核電廠 3 部機組，日本確定除役的反應爐達 24 部。截至 2021 年 8 月，日本可運轉的核子反應爐共 33 座，總裝置容量 31679 MWe，退居全球第 4 大核電國。³⁹ 圖 1 和圖 2 分別為日本歷年核電裝置容量的統計與 2021 年全球前十大核電國家的相關統計資料。

³⁶ 2021 年 6 月 18 日公布的綠色成長戰略修訂版，快中子增殖反應爐已列為新的重點開發項目。〈日本經濟產業省修訂綠色成長戰略〉，《經濟部國際貿易局》，<https://info.taiwantrade.com/biznews/%E6%97%A5%E6%9C%AC%E7%B6%93%E6%BF%9F%E7%94%A2%E6%A5%AD%E7%9C%81%E4%BF%AE%E8%A8%82%E7%B6%A0%E8%89%B2%E6%88%90%E9%95%B7%E6%88%B0%E7%95%A5-2375932.html>。

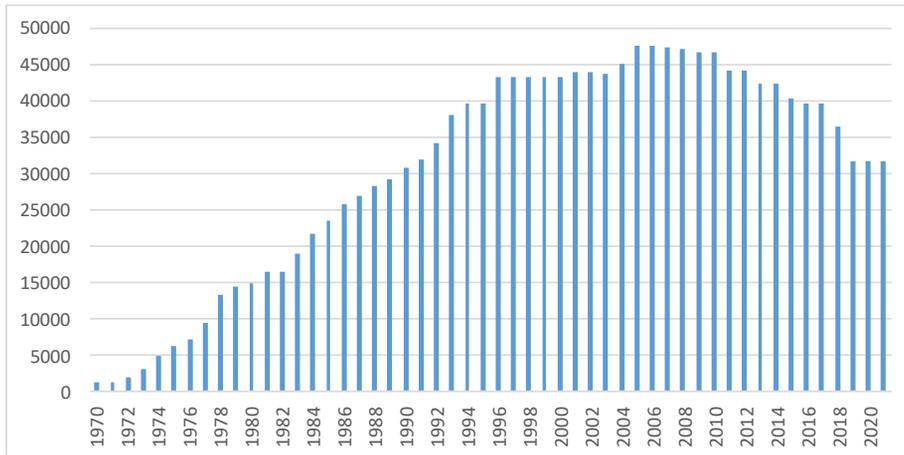
³⁷ “Anti-nuke protesters call for end to nuclear energy use,” *The Asahi Shimbun*, September 15, 2013, <https://web.archive.org/web/20141129042212/http://ajw.asahi.com/article/0311disaster/fukushima/AJ201309150018>.

³⁸ NRA 根據國際原子能機構的安全標準和指導方針，並採納日本國會核事故調查委員會所確定的事故報告，同時考慮日本特有的自然條件後，在假設嚴重事故隨時可能發生的基礎上制定了十分嚴格的新制法規。核電廠必須針對可能爆發的潛在嚴重事故，額外改造安全系統並接受嚴格的壓力測試。

³⁹ “Nuclear Power in Japan,” *World Nuclear Association*.

圖 1 日本核電裝置容量統計（1970~2021）

單位：MWe



資料來源：作者根據世界核能協會（World Nuclear Association）資料製作。⁴⁰

圖 2 全球 10 大核電國家核電裝置容量統計（2021）

單位：MWe



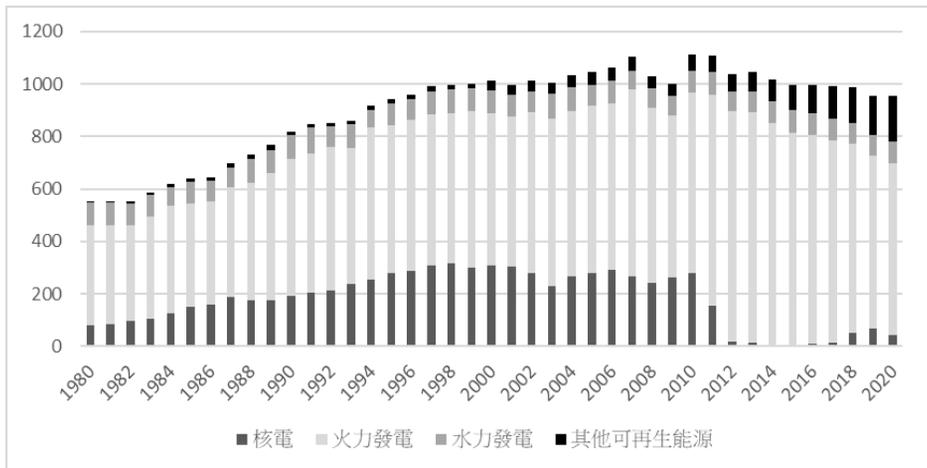
資料來源：作者根據世界核能協會（World Nuclear Association）資料製作。⁴¹

⁴⁰ “Nuclear Power in Japan,” *World Nuclear Association*, August 2021, <https://world-nuclear.org/focus/fukushima-daiichi-accident/japan-nuclear-power.aspx>.

⁴¹ *World Nuclear Association, World Nuclear Performance Report 2021*, <https://www.world-nuclear.org/getmedia/891c0cd8-2beb-4acf-bb4b-552da1696695/world-nuclear-performance-report-2021.pdf.aspx>.

在實際供電方面，雖然已有 25 部反應爐機組申請重新啟動，但由於 NRA 檢查程序冗長，加以部分地方政府反對，進展十分緩慢。至 2019 年底，日本核能發電僅占總供電量的 6.9%。⁴² 為填補核電供應缺口，日本只得仰賴天然氣、燃煤與石油等化石燃料發電。如圖 3 所示，由於進口能源大增，日本能源自給率因此隨之下滑。日本的能源自給率在所有經濟合作暨發展組織（Organization for Economic Cooperation and Development, OECD）國家中，敬陪末座。⁴³

圖 3 日本各類供電來源統計（1980~2020）



資料來源：作者依據美國能源資訊署 (U.S. Energy Information Administration, EIA) 資料製作。

小結以上敘述可知，自 1955 年《原子力基本法》通過後，日本便積極展開核電建設與技術研發。直到 2011 福島核災爆發前，日本對於核能

⁴² 5 座於 2016 年取得重啟許可的反應爐，平均審核時間 137 天。之後另外 4 部反應爐的平均檢查時間更長達 227 天。

⁴³ Jun Arima, "Reclaiming pragmatism in Japan's energy policy," *East Asian Forum*, April 3, 2021, <https://www.eastasiaforum.org/2021/04/03/reclaiming-pragmatism-in-japans-energy-policy/>.

還寄予厚望。事故發生後，政府一度決心徹底放棄核電。但在安倍晉三首相上台後，日本決定重建核電，核電在能源組合中的地位因而得以鞏固。值得注意的是，福島核事故造成日本國內輿論出現巨大轉變，相關事實與影響留待下文說明。

參、日本核能政策的驅動力

能源配置是非常複雜的系統。為了制定有效的能源政策，國家必須兼顧許多面向，包括能源安全、經濟效益、環境保護與到社會輿論等。由於大型技術系統具有強大慣性，改變一個國家的能源系統和技術發展策略，是一項極具挑戰的任務。根據以往經驗，若發生嚴重程度達國際核能事件分級表 5 級以上的事務，如 1979 年美國三哩島 (Three-Miles Island) 意外，通常會造成公眾輿論和政府政策的實質改變，⁴⁴ 福島核事故也不例外。影響所及，德國政府 2011 年 5 月 30 日宣布，將於 2022 年起不再使用核電。⁴⁵ 瑞士政府也決定占發電比例 40% 的 5 部反應爐不再延役，2034 年完全廢核。⁴⁶ 義大利人民在 2011 年 6 月 12、13 兩日的公民投票，以 94% 票數比例反對重啟核能發電，總理貝魯斯柯尼 (Silvio Berlusconi) 對該項結果表示，「我們或許得向核電廠告別了...」。⁴⁷ 同樣的，福島核災後，日本民眾對於核電的支持程度也是一蹶不振。然而，日本政府卻依然堅持核電不可或缺。究竟是何力量驅動日本的核能政策，本節將藉由路徑依賴理論

⁴⁴ Detlef Jahn & Sebastian Korolczuk, "German exceptionalism: the end of nuclear energy in Germany!," *Environmental Politics*, Vol. 21, No. 1 (January 2012), pp. 159-164.

⁴⁵ "Germany: Nuclear power plants to close by 2022," *BBC*, May 30, 2011, <https://www.bbc.com/news/world-europe-13592208>.

⁴⁶ "The Swiss cabinet wants to gradually decommission all of Switzerland's nuclear power plants by 2034," *swissinfo.ch*, May 25, 2011, <https://www.swissinfo.ch/eng/swiss-to-phase-out-nuclear-power-by-2034/30315730>.

⁴⁷ "Italy nuclear: Berlusconi accepts referendum blow," *BBC*, June 14, 2011, <https://www.bbc.com/news/world-europe-13741105>.

的重點，從認知與期待、效益與報酬及制度與結構三方面，探討日本核能政策的形成與演進。

一、認知與期待

根據 Roh Pin Lee 和 Silke Gloaguen 兩位學者對法國核能政策進行的一項研究發現，過去的能源決策往往會影響和約束未來的選擇，導致出現政策鎖定的現象。⁴⁸ 因此，在試圖理解日本政府核電政策的動機與發展，有必要進行回顧性的分析。

基本上，自 19 世紀中葉以來，日本就接受並適應了西方的技術和科學，並且成功加以應用。日本的核能研究其實頗具歷史，且實力足以媲美西方國家。早在 1929 年，被譽為日本現代物理學之父的仁科芳雄（Yoshio Nishina）自歐返國，旋即成立了仁科實驗室（Nishina Laboratory），從事宇宙射線和粒子加速器的研究。⁴⁹ 同時代的東北大學教授彥坂忠義（Tadayoshi Hikosaka），更在 1934 年首先提出利用原子核蘊藏的巨大能量，進行核能發電和武器製造的可能性。較德國化學家奧托·哈恩（Otto Hahn）和弗里茨·施特拉斯曼（Fritz Strassmann）在 1938 年 12 月發現核裂變，還早了四年。⁵⁰ 1941 年，日本政府也曾委託仁科實驗室，研究核武器製造的可行性。如同歷史學家約翰道爾（John W. Dower）所稱，日本擁有和其他國家一樣優秀的核能物理學家。⁵¹

⁴⁸ Roh Pin Lee & Silke Gloaguen, "Path-dependence, lock-in, and student perceptions of nuclear energy in France: Implications from a pilot study," *Energy Research & Social Science*, Vol. 8 (July 2015), pp. 86-99.

⁴⁹ "Yoshio Nishina – Father of Modern Physics in Japan," *Nishina Memorial Foundation*, https://www.nishina-mf.or.jp/doctor_en.

⁵⁰ Benjamin K. Sovacool & Scott Victor Valentine, *The National Politics of Nuclear Power: Economics, Security, and Governance*, p. 104.

⁵¹ 例如，1944 年彥坂忠義在東京一場物理論壇上發表的論文中，預測了快中子對未分離鈾的鍊式裂變反應，為日後快中子增殖技術奠定了理論基礎。John W. Dower, *Embracing Defeat: Japan in the Wake of World War II* (New York: W. W. Norton & Company, 1999), p. 237.

雖然二戰後在美軍佔領時期，日本的核能研究被迫徹底瓦解。⁵² 然而，當東亞的地緣政治在 1950 年代發生劇烈動盪，核能政治也隨之出現了變化。由於擔心共產主義列強的崛起，威脅到國際秩序的安全，美國決定將日本轉變為盟友，以加強美國的核子戰略平衡。⁵³ 適逢日本亦亟於恢復經濟成長，尤其寄望工業與科技發展，助其重建以往強盛的國力。懷抱著對未來榮景的想像，日本決定放下不堪的歷史記憶，通過原子能和平用途計畫，引進未來可望在科學領域創造奇蹟的核能技術。日本此舉正式服膺了長期所深信的座右銘，也就是結合日本精神與西方技術，創造輝煌。⁵⁴ 在往後的數十年裡，日本也確實成為了全球核能科學領域的先驅。

二、效益與報酬

由於缺乏國產能源，日本的能源結構十分脆弱，能源需求嚴重依賴進口。鑒於太平洋戰爭正是由於美國的經濟制裁，導致日本國內石油短缺，迫使日本突襲珍珠港而爆發。復因戰爭時期，日本的貿易路線又一再受到美國的攻擊和封鎖，造成能源供應中斷，最終戰敗。⁵⁵ 歷史教訓提醒了日本依賴進口能源的高度風險。雖然戰後得力於大量進口的化石燃料，日本經濟發展從廢墟中連續高速增長二十餘年。但如圖 4 所示，日本將近 90% 的原油，來自政治局勢極不穩定的中東地區。在歷經 2 次石油危機後，這種地理和商品的脆弱性，更讓日本意識到減少對進口能源的依賴，至關重要。長久之計，核能才是通向能源獨立與國家安全的捷徑。

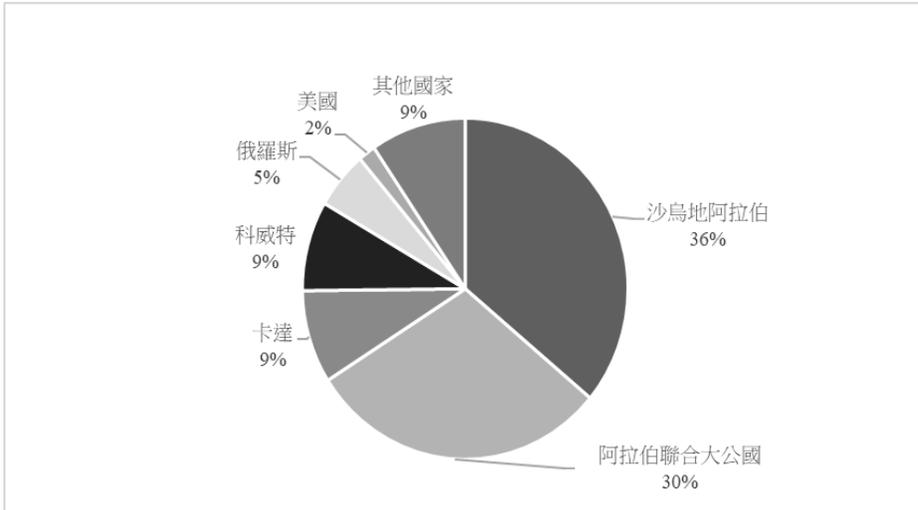
⁵² 為了摧毀日本的核能研究實力，美軍甚至沒收了無關軍事用途，純粹用於醫學研究的兩台迴旋加速器，並將之象徵性地傾倒在東京灣內。

⁵³ 在和平利用核能的承諾下，美國表明如果需要的話，美國夥伴可以製造核武器。

⁵⁴ Maxime Polleri, "Why Japan Might Not Abandon Nuclear Power," *The Diplomat*, March 11, 2021, <https://thediplomat.com/2021/03/why-japan-might-not-abandon-nuclear-power/>.

⁵⁵ Satoru Nagao, "Japan's nuclear reactors can power US-Asian security," *Hudson Institute*, June 23, 2018, <https://www.hudson.org/research/14430-japan-s-nuclear-reactors-can-power-u-s-asian-security>.

圖 4 2019 年日本原油進口來源



資料來源：作者根據美國能源資訊署資料製作。

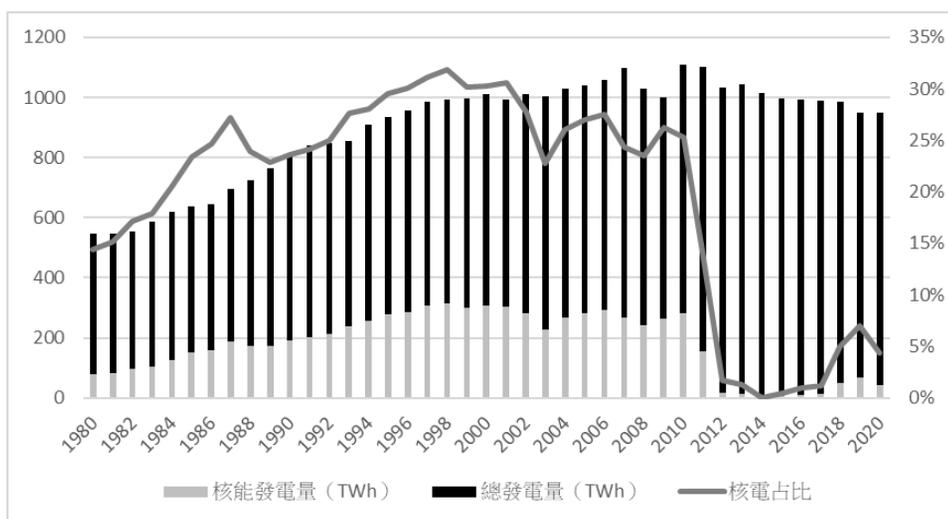
隨著核電設施不斷擴增，如圖 5 所示，日本核電在電力供給的比重，自 1980 年代中期以後便維持在 20% 以上。核能在日本能源結構的比重逐年攀升，最直接的效益便是能源自給率明顯提高，能源安全獲得改善。不僅如此，核能發展還與經濟發展相關。一方面進口能源減少，為日本省下了可觀的支出。據日本能源經濟研究所（Institute of Energy Economics, Japan, IEEJ）的分析，長期以來核能發電已助日本免於向海外輸送 33 萬億的日元（約 2760 億美元）。⁵⁶ 反觀福島核事故後，由於電廠陸續停機，電力缺口由火力發電替代，化石燃料進口大增，化石燃料發電比例在 4 年內從 62% 迅速上升到 88%。不僅危及能源的安全性，增加的燃料成本更是驚人。依照日本原子力產業協會（Japanese Atomic Industry Forum, Inc., JAIF）的統計，日本每年增加的進口燃料成本約 3.8 至 4 萬億日元。如果核電廠持續關閉，將導致每年 3.6 萬億日元（約 350 億美元）的財富流向

⁵⁶ “Nuclear Power in Japan,” *World Nuclear Association*.

海外。⁵⁷

另一方面，供應穩定且價格低廉的電力，有助於降低生產成本，提高出口競爭力。然而，自 2011 年起，進口燃料價格的上漲加上日元貶值的影響，日本連續五年出現貿易赤字，2014 年的赤字更高達 12.8 兆日元。⁵⁸ 2014 年 6 月，日本經濟團體聯合會（Japan Business Federation）、日本商工會議所（Japan Chamber of Commerce and Industry）和經濟同友會（Association of Corporate Executives）等三大商業團體，因此聯袂向政府陳情，要求早日重啟核能電廠。顯見核能發電對於經濟成長與貿易出口的影響，已令日本對於核電產生一定的依賴。

圖 5 日本核能發電量與總發電量統計（1980~2020）



資料來源：作者根據美國能源資訊署資料製作。

除了能源安全與經濟效益外，追蹤日本政府應對全球氣候變遷的路線

⁵⁷ “Nuclear Power in Japan,” *World Nuclear Association*.

⁵⁸ “Cool Earth-Innovative Energy Technology Program,” *Ministry of Economy, Trade and Industry*, March 2008, http://www.iae.or.jp/wp/wp-content/uploads/2014/09/Cool_Earth08_e/CoolEarth_RM.pdf.

圖，核電更是不可或缺的關鍵能源。日本應對氣候變遷的作為有以下幾個關鍵的里程碑。首先，1996年12月聯合國氣候變化綱要公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)第三次締約國大會(COP3)在日本京都召開，身為京都議定書(Kyoto Protocol)簽署地的地主國，日本承諾將目標年(2008至2012)的二氧化碳排放量較基準年(1990)削減6%。其次，2007年5月，在名為「亞洲未來」(Asian Future)的國際會議上，安倍晉三首相率先發起，以2050年全球溫室氣體排放量較當前排放量減少50%為目標。⁵⁹ 2008年經濟產業省根據日本原子力研究開發機構的研究模型，推出「涼爽地球50」(Cool Earth 50)能源創新技術計畫。⁶⁰ 按該計畫內容，日本2050年的二氧化碳排放量將較2000年的水準減少54%，2100年更進一步減少90%，其中51%的減量正是來自使用核能的貢獻。為此，經濟產業省2010年第三次修訂能源戰略時，提出至2020年新建9座反應爐，2030年再增建至14座的計畫，藉以提高核能在能源配置的比例及能源自給率。⁶¹ 2015年，在聯合國氣候變遷綱要公約締約國於巴黎召開第21屆大會(COP21)前，日本依規定提出「國家自主貢獻」(Nationally Determined Contribution, NDC)，承諾到2030年將溫室氣體排放量從2013年的水準減少26%。2020年10月26日菅義偉首相更雄心勃勃地承諾，日本將在2050年實現「碳中和」(Carbon neutrality)

⁵⁹ “The Future of Asia: Be Innovative - Speech by Prime Minister Shinzo Abe,” *Prime Minister of Japan and His Cabinet*, May 21, 2015, https://japan.kantei.go.jp/97_abe/statement/201505/0521foaspeech.html.

⁶⁰ “Cool Earth-Innovative Energy Technology Program,” *Ministry of Economy, Trade and Industry*, March 2008, http://www.iae.or.jp/wp/wp-content/uploads/2014/09/Cool_Earth08_e/CoolEarth_RM.pdf.

⁶¹ John S. Duffield & Brian Woodall, “Japan’s new basic energy plan,” *Energy Policy*, Vol. 39, No. 6(April 2011), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511002837?via%3Dihub> ; <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0301421511002837?token=743B914629CED68D56C5D1E75701233D0ABE85F77E765B250B68596E81D1A84900D60A278F7D9624FBA704C38E647224&originRegion=us-east-1&originCreation=20210916065837>.

的目標。這項決定更加重了日本提高低碳能源的迫切性。⁶² 正如經濟產業大臣梶山弘志（Hiroshi Kajiyama）公開表示，日本在實現碳中和的努力過程中，核電將不可或缺。⁶³ 依據日本能源經濟研究所估計，倘若一座容量 1 GWe 的核電廠在年需求約 100TWh 的地區停止運作一年，除了將增加 600 億日元的化石燃料成本外，二氧化碳的排放量也將增加 400 萬噸。⁶⁴ 為了在對抗全球暖化的議題上取得領先國際的地位，日本政府因此對於零碳排放的核電，維持高度肯定的態度。

根據研究，一座核電廠建造成本平均 50 至 70 億美元，如此規模和資本密集的投資，需要一個具備特定形式和融資能力的社會，核電生產的連續性也最適合電力需求相對集中和穩定的能源密集型社會。自 1970 年代以來，日本政府預算中 97% 的能源支出都用於發展核電。⁶⁵ 日本的核電開發正呼應了經濟學者威廉·亞瑟（William Brian Arthur）的看法，亦即國家一旦對特定技術和相關基礎設施進行投資，就會增加回報並降低沿此路徑前進的成本。這種報酬遞增的結果往往產生強化作用，從而降低了偏離路徑的可能性。⁶⁶

三、制度與結構

路徑依賴的研究者除了關注消費商品和技術外，也發掘可適用該理論

⁶² 碳中和是指根據聯合國氣候變化框架公約（UNFCCC）提交的國家清單中的國家溫室氣體總排放量（即排放量減去清除量）淨值為零。巴黎協定（Paris Agreement）明確呼籲社會進行範式轉變，將本世紀末實現全面脫碳 decarbonization 作為全球目標。

⁶³ “Japan needs nuclear power, says energy minister,” *World Nuclear News*, February 3, 2021, <https://world-nuclear-news.org/Articles/Japan-needs-nuclear-power-says-energy-minister>.

⁶⁴ Florentine Koppenborg, “Nuclear Restart Politics: How the ‘Nuclear Village’ Lost Policy Implementation Power,” *Social Science Japan Journal*, Vol. 24, Issue. 1(Winter 2021), pp. 115-135.

⁶⁵ Hiroshi Ohta, “The Analysis of Japan’s Energy and Climate Policy from the Aspect of Anticipatory Governance,” *Energies*, Vol. 13, No. 19(2020), <https://doi.org/10.3390/en13191513>.

⁶⁶ Michael R. Nelson, “W. Brian Arthur’s The Nature of Technology—What It Is and How It Evolves,” *The European Institute*, December 31, 2018, europeaninstitute.org.

的其他領域。經濟學家道格拉斯·諾思（Douglass Cecil North）首先將路徑依賴理論拓展到制度的變遷，描述制度何以演變成難以變動的鎖定狀態。保羅·皮爾森（Paul Pierson）則引用其概念並進一步指出，在現有結構下，相關特殊利益團體與制度共存共榮，具有保持制度或政策延續的動力。⁶⁷ 誠如日本東北大學社會學系教授長谷川公一（Koichi Hasegawa）所稱，制度因素一直是日本核能政策選擇的幕後推手。⁶⁸

日本科技菁英建構國家未來願景並實際介入政策制定已行之多年。日本能源決策長期由官僚體系所主導，早已形成核能官僚主義。儘管各機構彼此間存在潛在的衝突，有時目標又不盡相同，但為了確保產業制度和發展戰略的一致性，日本始終可就核能的未來發展達成共識。⁶⁹ 雖然 1951 年日本的電力公用事業已私有化，電力市場由十家主要的電力公司所壟斷，但政府仍保留技術類型的選擇和發展的控制權。在通商產業省和經濟產業省的垂直整合與嚴格控管下，決策者和產業界形成複雜且密切的相互依存關係。例如，在核電早期擴張時代，專業人員在相關機構之間輪換是常有之事。此舉將政府管理階層和產業執行機構緊密聯繫在一起，形成一定程度的凝聚力。

其次，自 1973 年第一次石油危機後，日本政府確定核能為主要進口替代能源。1974 年 6 月，通商產業省自然資源與能源廳推出「電力三法」，⁷⁰ 由政府透過複雜的補貼制度，提供充裕資金來推動核能電建設。⁷¹ 同

⁶⁷ Paul Pierson, *Politics in Time: History, Institutions, and Social Analysis* (Princeton, NJ: Princeton University Press, 2004).

⁶⁸ Koichi Hasegawa, *Beyond Fukushima: Toward a Post-Nuclear Society*, trans., Minako Sato (Melbourne, Australia: Trans Pacific Press, 2015), p.27.

⁶⁹ 例如 H. Yoshioka 便認為日本的核能治理是雙重結構，分別由主持技術研發的科學技術廳和管理電力事業單位的產業通商省共同負責。

⁷⁰ 電源三法分別是電源開發促進稅法(electric power Development Taxation Law)、電源開發促進對策特別會計法(the Special Budget Law for the Development of Electric Power)以及發電用設施周邊地區整備法(the Law for the Adjustment for Areas Adjacent to Power Generating Facilities)。

⁷¹ 為激勵人口減少的村鎮接受核能電廠 (Aldrich 2008)，政府提供當地政府每年數百萬美

時，為協助降低事業單位技術開發中所承擔的風險，日本政府還將公部門的技術研發成果，無償移轉給私營部門。假使沒有政府財政支持和集中協調，日本核能計畫恐怕難以順利推動。在政策和法規的推波助瀾下，上自政府官僚、重工集團、學術界以及大眾媒體，下至區域電力公司、製造商、工會和核電廠所在地政府，早已自成一個特殊體系。由於該系統具有相當程度的排他性，被冠以「核村」(nuclear village)的名稱。⁷²如同前首相菅直人(Naoto Kan)在一場新聞發布會上所言，「支持核能的都是核村裡的人，因為他們總想要保護自己的既得利益。」⁷³由於日本缺乏如綠黨般強調環境議題的團體，在既有的制度與結構下，核能政策因此難以產生實質性變化，連帶產生的鎖定效應也從而構成國家能源系統轉型的障礙。

學者研究發現，現代國家已經無可避免地必須將統治合法性建立在大規模科技計畫當中。因為核能開拓了眾多的政治可能性，核能計畫也因此成為最主要的場域。⁷⁴從以上各點說明可知，在現代化的歷史過程中，對科技力量的肯定，已嵌入日本的文化脈絡之中。即使歷經兩顆原子彈的巨大傷害，日本仍然願意重新接納象徵先進技術的核能發電。核能對日本的吸引力，也來自它與國家發展願景的聯繫，導致日本高度肯定從核能中獲得的優勢。日本政府不但將核能視為減少進口依賴的替代，也是在應對氣候變化的挑戰時，能夠確保供給穩定和價格低廉的能源。簡言之，日本對

元經費，以補貼交通建設與醫療照護等社會福利。隨著時間推移，當補助減退，地方政府為維持預算，又再提出增設點場的請求。因此，許多城鎮如新潟市和刈羽市等，竟擁有多達六、七座核反應爐。批評者稱此現象為反覆成癮。

⁷² Jeff Kingston, "Japan's Nuclear Village," *The Asia-Pacific Journal*, Vol. 10, Issue. 37, September 9, 2012, <https://apjif.org/2012/10/37/Jeff-Kingston/3822/article.html>.

⁷³ Linda Sieg, "Ten years after Fukushima, Japan remembers 'man-made' nuclear disaster," *Reuters*, March 9, 2021, <https://www.reuters.com/article/us-japan-fukushima-anniversary-legacy/ten-years-after-fukushima-japan-remembers-man-made-nuclear-disaster-idUSKBN2B103H>.

⁷⁴ Itty Abraham, "The Ambivalence of Nuclear Histories," In John Krige & Kai-Henrik Barth, eds., *Global Power Knowledge: Science, Technology, and International Affairs* (Chicago: University of Chicago Press Journals, 2006), p. 64.

核電的總體評估，始終維持一定程度的正面期待。由政策和法規所創造的效益和其所凝聚的團體，也發揮了自我強化與政策鎖定的效應。無怪福島核災後，雖然短暫接任首相一職的野田佳彥（Yoshihiko Noda）認為，日本即使廢除核電也能滿足國內電力需求，⁷⁵ 但繼任的政府仍然將核電視為國家能源戰略之必要。

肆、挑戰與展望

2015年8月11日，九州電力（Kyushu Electric Power）川內（Sendai）核電廠1號機組終於再次啟動，這是日本核電因福島核災而陷入全面停頓以來首度啟用核能發電。⁷⁶ 日本核能電廠看似正逐漸復原，新建的柏崎刈羽6號及7號機組也已通過新規制的要求，進入實質性的認證階段。然而，截至2021年8月，僅有10部反應爐機組順利重啟。儘管日本政府在其長期能源戰略中，已明確勾勒出核能的未來，但礙於民眾的信任與支持大幅衰退，前景未必樂觀。

日本內閣早在2011年10月公布的能源白皮書便明白指出，福島核災嚴重破壞公眾對核電安全的信心，民眾對核電的支持已大不如前。⁷⁷ 雖然早期日本社會也曾十分排斥核能，甚至認為核能代表的是一種不幸。不過由於自民黨長期掌握議會的多數優勢和對媒體的控制，加以日本社會又盛行為國家利益而犧牲小我的精神，核電開發的風險因此得以遠離公眾的關注。除非建設項目或開發計畫造成當地社區或特殊利益集團極端困擾，否

⁷⁵ David Cyranoski, “Japan considers nuclear-free future.”

⁷⁶ “Japan's First Nuclear Reactor Starts Operation After Fukushima Disaster,” *Sputnik*, October 9, 2015, <https://sputniknews.com/20150910/1026821679.html>.

⁷⁷ Tsuyoshi Inajima & Yuji Okada, “Nuclear Promotion Dropped in Japan Energy Policy After Fukushima,” *Bloomberg*. Oct 28, 2011, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2011-10-28/nuclear-promotion-dropped-in-japan-energy-policy-after-fukushima>.

則反對意見通常被忽略不計。⁷⁸ 不過自 1990 年代後期，先是 1995 年 12 月 8 日文殊（Monju）反應爐發生火災，接著東海村（Tokaimura）在 1997 年 3 月和 1999 年 9 月接連發生兩次意外，⁷⁹ 2002 年東京電力公司甚至傳出偽造反應爐設備檢查文件的醜聞。⁸⁰ 一連串事件使核電產業聲譽受損，也開始衝擊公眾對於核能安全的信心。但雖如此，核能仍被視為支持經濟繁榮的必要之惡。根據國際原子能總署（International Atomic Energy Institute, IAEA）2005 年進行的一項調查報告，日本民眾支持增建核電廠或維持現有數量的比例高達 82%，只有 15% 主張廢除核電。⁸¹ 直到 2011 年福島核災爆發，隨著危機持續拖延，大眾對於核能的支持率開始下滑。根據 2011 年 4 月至 5 月間各家機構進行的民意調查顯示，主張完全廢除或減少部分核能電廠的比例介於 41~54% 之間。⁸² 2012 年的調查發現，日本 50 家最受歡迎的新聞媒體中有 47 家抱持反核的立場。到了 2013 年 3 月，53% 的受訪者希望減少核電，20% 則主張完全取消。⁸³

日本民眾態度大幅逆轉，既是出於對核電安全的高度焦慮，也代表對政府的高度不信任。首先，由日本國會委託民間專家學者組成的「福島核事故獨立調查委員會」（Fukushima Nuclear Accident Independent

⁷⁸ Joseph G. Morone & Edward J. Woodhouse, *The Demise of Nuclear Energy? Lessons for Democratic Control of Technology* (New Haven: Yale University Press, 1989), p. 18.

⁷⁹ 東海村兩起核事故第一次發生在 1997 年 3 月 11 日。由於核廢料工廠加熱不當，失火爆炸。第二起事故發生在 1999 年 9 月 30 日，事故原因為核燃料整備工廠在燃料加工過程中，依私自規定的操作流程進行作業，導致發生臨界事故，造成兩名工作人員死亡。後者被列為嚴重危急事故。是福島核災爆發前，日本最嚴重的核事故。

⁸⁰ 國際原子能總署 1992 年曾對福島第二核電站的運行安全績效，進行深入評審並提出若干建議，但東京電力公司卻駁回這些建議。2002 年東電被披露曾偽造 29 起在反應爐中裂縫的維修記錄。

⁸¹ International Atomic Energy Agency, “Global Public Opinion on Nuclear Issues and the IAEA - Final Report from 18 Countries,” *Working Papers id:362, eSocialSciences*, 2006, <https://ideas.repec.org/p/ess/wpaper/id362.html>.

⁸² M. V. Ramana, “Nuclear power and the public,” *Bulletin of the Atomic Scientists*, Vol. 67, No. 4 (July/August 2011), <https://journals.sagepub.com/toc/bosb/67/4>.

⁸³ “Nuclear Power in Japan,” *World Nuclear Association*.

Investigation Commission) 所提出的報告，揭露了東京電力公司和相關部門，對於危機預防缺乏充分準備，並且嚴重忽視安全標準。⁸⁴ 造成這種現象的主要原因，是由於日本核電界盛行技術至上與保密文化，政府放任業者隱匿信息並自訂安全指南。⁸⁵ 由於日本的監管模式與國際通則不符，2007年國際原子能總署曾要求日本釐清其管理機制。不過日本原子能安全委員會卻聲稱日本的監督體系運作良好，足以充分確保核電安全處於卓越水準，即使參照一般國際標準行事，績效也不見得會更好。⁸⁶ 核電人士過度自信且傲慢的態度，以致於福島核災被喻為是日本「加拉巴哥症候群」(Galapagos syndrome) 所造成的結果。⁸⁷ 該調查報告也暴露出日本核電制度結構存在重大缺陷，例如將負責監督的原子力安全保安院，置於受監督的組織經濟產業省內；受監管的公用事業單位可聘用監督機構退休官員主掌受監管的業務等，皆明顯涉及權責不分與利益衝突。當調查委員會主席黑川清 (Kiyoshi Kurokawa) 在報告的引言中明確認定，「這完全是一場人禍，我們本來可以也應當預見並避免它的發生...」時，⁸⁸ 日本民眾對於政府核電治理的能力不再信任。

⁸⁴ “The official report of The Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission - Executive summary,” *Reliefweb*, July 6, 2012, <https://reliefweb.int/report/japan/official-report-fukushima-nuclear-accident-independent-investigation-commission>.

⁸⁵ Yoichi Funabashi & Kay Kitazawa, “Lessons from Japan’s nuclear accident,” *East Asia Forum*, March 26, 2012, <https://www.eastasiaforum.org/2012/03/26/lessons-from-japan-s-nuclear-accident/>.

⁸⁶ “Nuclear Power in Japan,” *World Nuclear Association*.

⁸⁷ 加拉巴哥症候群是日本的商業用語，指長期在封閉的環境中獨自演化，喪失和區域外的互動，面對來自外部適應性和生存能力更強的商品或技術，最終陷入被淘汰的危險 Peter Drysdale, “Rebuilding trust after the Fukushima disaster,” *East Asia Forum*, March 9, 2015, <https://www.eastasiaforum.org/2015/03/09/rebuilding-trust-after-the-fukushima-disaster/>。

⁸⁸ Hiroko Tabuchi, “Inquiry Declares Fukushima Crisis a Man-Made Disaster,” *New York Times*, July 5, 2012, <https://www.nytimes.com/2012/07/06/world/asia/fukushima-nuclear-crisis-a-man-made-disaster-report-says.html>.

其次，福島核事故不僅破壞民眾對政府的信心，也殃及對科學的信賴。日本公眾以往深信科學家的知識與智慧有助於做出正確的決策，但福島核災徹底戳破核安神話。日本科學技術振興機構（Japan Science and Technology Agency, JST）研究人員 Yasushi Sato 便認為，民眾開始不再輕易接受簡單而樂觀的科學主張以及這些專業論點對公共政策制定的貢獻。人們懷疑科學家輕易贊同政府的立場，對其公正性的信心因而動搖。⁸⁹ 根據日本放送協會（Japan Broadcasting Corporation, NHK）2021 年 3 月進行的最新調查報告，仍有 85% 的受訪者擔心發生核電意外。只有 12.3% 的人支持核電，60.6% 的人認為核電應當被淘汰或立即關閉。⁹⁰ 礙於民眾支持度持續減弱，一向支持核電的自民黨政府一再保證，將核安全放在首位，並盡可能減少對核能的依賴。

由於重啟核電的進度未如預期，2019 年核能發電占總電力供給的比例仍不足 7%。2021 年 1 月，日本原子力產業協會籲請政府儘速重啟閒置的反應爐，並強調核能對實現政府碳中和目標的重要性。日本鋼鐵聯盟（Japan Iron and Steel Federation）在 2021 新年聲明中也呼籲政府重啟核電廠，「為受高工業電價所苦的日本企業，找到緊急解決方案。」⁹¹ 然而，2021 年 7 月最新公告的戰略能源計畫修訂草案，新建核電廠仍不在預定計畫之列。由於日本近半數核反應爐使用年期至 2030 年將逾 40 年，倘若不再擴增核電設施，日本政府預計 2030 年核電在電力組合的比重回升至

⁸⁹ Yasushi Sato & Tateo Arimoto, "Five Years after Fukushima: Scientific Advice in Japan," *Palgrave Communications*, Vol. 2(2016), https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2828626.

⁹⁰ "Japan still grappling with the legacy of Fukushima a decade on," *East Asia Forum*, March 8, 2021, <https://www.eastasiaforum.org/2021/03/08/japan-still-grappling-with-the-legacy-of-fukushima-a-a-decade-on/>.

⁹¹ "Japanese industry leaders call for nuclear restarts," *World Nuclear News*, January 8, 2021, <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Japanese-industry-leaders-call-for-nuclear-restart>.

20~22%的目標，恐將成為泡影。

值得注意的是，在美國總統拜登 (Joe Biden) 於 2021 年 4 月 22、23 兩日召集的「地球峰會日」上，日本首相菅義偉再次宣布了新的目標，將日本 2030 年溫室氣體排放量從原本較 2013 年的水平減少 13%，大幅提高到減少 46%。⁹² 為響應政府新的氣候目標，福井縣知事杉本達治 (Tatsuji Sugimoto) 在數日後 (4 月 28 日) 宣布批准已超過 40 年的關西電力公司美濱 (Mihama) 核電廠 3 號機組和高濱 (Takahama) 核電廠 1、2 號機組重啟運轉。⁹³ 這是自政府立法規定反應爐的基本使用年限為 40 年，最多可再延長 20 年後，首次有超過 40 年的反應爐能夠重新啟動。經濟產業大臣梶山弘志並進一步承諾，日本未來將提供高達 25 億日元 (2310 萬美元) 的政府補助金，用於重啟超過 40 年的反應爐。為了達成新的氣候目標，自民黨政府對於核能的支持似乎開始有了積極的行動。⁹⁴

展望未來，雖然菅義偉首相曾強調，對抗全球氣候問題的脫碳計畫，並非以核電廠的新建或擴建為前提，但也未斷然排除以建造新電廠來實現 2050 碳中和目標的選項。不過，從前述說明可知，在進一步具體擴大核電之前，如何重新獲得公眾信任，對日本政府和科學界來說，都是一項必要且嚴峻的工作。日本政府除了必須優先解決福島核災和過去核電發展所遺留的問題外，秉持以下公正、公平、公開等三項關鍵原則的措施或安排，或可重新獲得公眾對核電的信任與支持。

⁹² Kiyoshi Takenaka, Yoshifumi Takemoto & Yuka Obayashi, "Japan vows deeper emission cuts as Biden holds climate summit," *Reuters*, April 22, 2021, <https://www.reuters.com/business/environment/japan-government-propose-new-target-cutting-greenhouse-gases-by-46-nikkei-2021-04-22/>.

⁹³ 美濱 3 號機於 1976 年 12 月開始運轉，高濱 1、2 號機分別為 1974 年 11 月和 1975 年 11 月啟用，皆是至少超過 44 年的反應爐。

⁹⁴ "Japan allows 1st restarts of nuclear reactors older than 40 years," *Nikkei Asia*, April 28, 2021, <https://asia.nikkei.com/Business/Energy/Japan-allows-1st-restarts-of-nuclear-reactors-older-than-40-years>.

一、公正

福島核災最重要的教訓就是以往政府決策過程缺乏透明度和問責制。日本政府雖然已經設置獨立的原子力規制委員會，但該委員會主要負責監督核能設施的安全，並不具政策評估的權力。職是故，建立獨立機構以行使對行政部門的法律監督，是既迫切且必要的工作。

二、公平

在核電重要爭議問題上，親核和反核行為者之間幾乎沒有建設性的辯論。大多數信息來自雙方各自的倡議團體，很難獲得有關核安風險充分且可靠的信息。能源和環境委員會在 2011 年 7 月 29 日舉行的會議上，曾呼籲反對核能發電和推動核能發電的雙方，應克服彼此間的對抗。2016 年 5 月 28 日七大工業國伊勢志摩峰會（Ise-Shima Summit Declaration）宣言，也同樣強調促進公眾參與以科學為基礎的對話，至關重要。⁹⁵

三、公開

確保公眾對科學的信任和支​​持是日本政府的一項緊迫任務。正如東京大學公共政策學院教授鎗目雅（Masaru Yarime）的建議，日本必須採取更多措施來重新獲得公眾對科學的信任。讓專業科學知識和科學家參與政策制定的過程對公眾更加開放，確保迅速完整地披露與核能有關的信息，尤其重要。

儘管福島核事故發生後，部分國家決定徹底放棄核電。但近來核電又已重獲關注。不僅 2020 年 7 月，美國參議院通過了加強核能發電與擴展相關技術的「核能領導法案」（Nuclear Energy Leadership Act, NELA）。⁹⁶

⁹⁵ “G7 Ise-Shima Leaders’ Declaration,” *White House*, May 27, 2016, <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2016/05/27/g7-ise-shima-leaders-declaration>.

⁹⁶ “US Senate passes Nuclear Energy Leadership Act,” *World Nuclear News*, July 27, 2020, <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/US-Senate-passes-Nuclear-Energy-Leadership-Act>.

聯合國政府間氣候變化委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）於 2021 年 8 月 9 日，發布第六份氣候變遷專家小組報告後不久，⁹⁷ 聯合國歐洲經濟委員會（United Nations Economic Commission for Europe）旋即在隔（11）日明確指出，倘若將核能利用排除在外，世界將無法實現已達成協議的二氧化碳減排目標。⁹⁸ 鑒於氣候變化趨勢已不可逆轉，國際社會對於核能發電的肯定似乎正在增溫。在可預見的未來，無論基於自身能源安全與經濟活動的需求，或是為了對應全球暖化所造成的危機，日本的核電政策仍將持續引發熱議。

伍、結論

能源專家艾默里·洛文斯（Amory Lovins）對於日本曾有如下評論，「一個地震與海嘯頻傳，還有 1.27 億居民的地區，實在不適合建置核子反應爐。」⁹⁹ 然而，從 1955 年原子力基本法通過後，日本的核電事業快速攀向高峰，成為僅次於美、法之後的全球第三大核電國家。就在政府仍積極規劃擴增核電產能之際，2011 年 3 月 11 日卻發生了震驚全球的福島核事故。然而，作為核災的直接受害者，日本卻並未如德國一般，做出徹底放棄核能的政治決定。在陸續發布的能源戰略相關計畫中，日本政府雖一再重申將盡可能減少對核電的依賴，但仍堅定主張應保持核電作為不可或缺的基本電力來源。顯然 2011 年之前與核能和技術相關的願景，仍然影響著日本的能源政策，政府對核電的態度並沒有根本改變。

整體而言，開發如能源系統這類大規模的技術系統，通常會產生路徑

⁹⁷ “IPCC report: ‘Code red’ for human driven global heating, warns UN chief,” *United Nations*, August 9, 2021, <https://news.un.org/en/story/2021/08/1097362>.

⁹⁸ “Global climate objectives fall short without nuclear power in the mix: UNECE,” *United Nations*, 11 August 11, 2021, <https://news.un.org/en/story/2021/08/1097572>.

⁹⁹ Amory Lovins, “Learning from Japan's Nuclear Disaster,” *Common Dreams*, March 19, 2011, <https://www.commondreams.org/views/2011/03/19/learning-japans-nuclear-disaster>.

依賴的顯著慣性。以日本來說，在歷史文化和政治背景的塑造下，科學家尤其以此感到自豪。核電不僅僅是電力問題，也是日本能源獨立的象徵。在邁向經濟強國的道路中，核能成為戰後復甦的核心，並被視為強大的現代國家的支柱。大量投入核電開發所創造的效益與形成的制度架構，使得核能科技已在日本能源系統中產生鎖定效應。正如前首相野田佳彥所稱，要徹底改變日本在半個多世紀的歷史中所建立的整個核電系統，並非易事。

10年前福島核災所造成的巨大損害，雖然令人遺憾，但也讓安全神話破滅的日本，得以整飭核電產業的監督管理，並迫使政治精英們重新思考能源政策的未來。由於2011年的福島事故嚴重破壞了公眾對核電安全的信心和對政府的信任。為了讓反對核電的民眾安心，日本政府祭出了嚴格的安全標準與審查機制，但也因此使得重啟核電的進程遠不如預期。倘若日本未來仍以2030年核電比例達20~22%和2050年實現碳中和為目標，便不能排除建造新電廠的選項。不過，在進一步採取行動之前，日本政府與核電產業必須努力挽回公眾嚴重流失的信任與支持。

綜言之，作為島國的日本，既缺乏化石燃料資源，也無管道或電網連接周邊國家，日本面對的地緣政治風險又一直存在。更有甚者，全球對抗氣候變化的行動也愈來愈加緊迫。這是日本政府在規劃核能相關的能源政策時，必須務實以對的情勢。

責任編輯：李欣樺