

加拿大核能發電現況摘要報告

2014 年 7 月 22 日

第 19 屆太平洋盆地核能大會(Pacific Basin Nuclear Conference, PBNC)將於 2014 年 8 月 24-28 日假溫哥華舉行，大會主題為「實現 21 世紀太平洋盆地核能科技之承諾」，將由環太平地區各國家，包括：加拿大、中華民國、日本、韓國、中國大陸、澳洲、美國、墨西哥等 20 個多個國家，主辦單位加拿大核能學會(Canadian Nuclear Society, CNS)預估今年大會將吸引 600 多各國代表之參與。在此每兩年一次召開之 PBNC 盛會前夕，特收集加拿大核能學會年度報告、加拿大核能安全委員會(Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC)年度評估報告、加拿大核能安全國家報告、加拿大核能協會民意調查報告、及世界核能協會有關加拿大核能發電現況報告等資訊，整理成加拿大核能發電之現況報告。

核能發電機組現況統計

根據 2014 年加拿大核能安全委員會(CNSC)之統計¹，到 2013 年底為止，加拿大有 6 座核能電廠共計 19 座運轉中之核能機組，集中在加拿大東部安大略省(Ontario)及新伯倫瑞克省(New Brunswick)，而在原子能總署統計 2013 年加拿大整體發電比例中²，核能佔了 15.96%，計發出玖佰柒什億度電(97 BkWh)，2011-2013 年平均機組能力因數(UCF)則為 80.9%，仍高於世界平均值之 76.3%，(註：我國 6 部運轉中核能機組平均每年約可達肆佰億度電，UCF 值為 90.4%)。除了以上運轉中 19 部機組外，加拿大另有兩部機組(Pickering 1 & 2 號機)處於安全儲存的除役狀態，Gentilly 2 號機則已決定除役並正處於永久停機到安全儲存之過渡階段。表 1 是所有加拿大核能機組之現況整理。

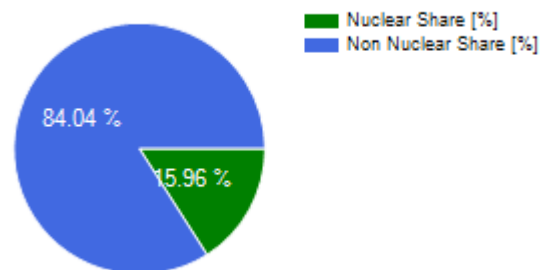


圖 1: 2013 年加拿大核能發電佔全體電力比例
(資料來源：國際原子能總署網站²)

表 1：加拿大核能機組現況統計表

Reactor	MWe net	Operator	First power	Status
Pickering A1	515	Ontario Power	1971/2005 ^a	Operating
Pickering A4	515	Ontario Power	1972/2003 ^a	Operating
Pickering B5	516	Ontario Power	1982	Operating
Pickering B6	516	Ontario Power	1983	Operating
Pickering B7	516	Ontario Power	1984	Operating
Pickering B8	516	Ontario Power	1986	Operating
Bruce A1	750	Bruce Power	1977/2012 ^a	Operating
Bruce A2	750	Bruce Power	1976/2012 ^a	Operating
Bruce A3	750	Bruce Power	1977/2004 ^a	Operating
Bruce A4	750	Bruce Power	1978/2003 ^a	Operating
Bruce B5	825	Bruce Power	1984	Operating
Bruce B6	825	Bruce Power	1984	Operating
Bruce B7	825	Bruce Power	1986	Operating
Bruce B8	825	Bruce Power	1987	Operating
Darlington 1	881	Ontario Power	1990	Operating
Darlington 2	881	Ontario Power	1990	Operating
Darlington 3	881	Ontario Power	1992	Operating
Darlington 4	881	Ontario Power	1993	Operating
Point Lepreau 1	635	New Brunswick Power	1982/2012 ^a	Operating
Pickering A2	515	Ontario Power	1971	Safe Storage
Pickering A3	515	Ontario Power	1972	Safe Storage
Gentilly 2	675	Hydro-Quebec	1982	Defueling

[註 a]: 翻修後再啟動年份

核能工業近況

加拿大核能年報(Nuclear Canada Yearbook)主編 Colin Hunt 在最近一期的刊物中指出，2013 年是該國核能發電具有顯著實績的一年，其中最重要的里程碑是所有 19 座服役中的核能機組均併聯發電，其中 Bruce A2 號機自 1995 年停機及翻修完成以後，於 2012 年 11 月再度重新商業運轉並供應安大略省的電網，隨後在 2013 年 8 月 15 日當各大修機組回復供電後，係自 1996 年以來，首次出現所有核能機組均能提供電力。Hunt 另指出在加拿大唯一的 CANDU-6 型反應器為位於新伯倫瑞克省(New Brunswick)之 Point Lepreau 1 號機，自 2008 年開始翻修，並於 2012 年

10 月 25 日併聯以來，雖遭遇一些問題，但總算於 2013 年 11 月達到額定滿載之 660 MW 電功率運轉。

至於在新建核能機組的計畫方面，雖然各電力公司曾提出在 Darlington 5&6 號機、Point Lepreau 2 號機、及 Peace River 興建多部機組的計畫，但因種種因素考量，目前均已中止或緩議，唯目前仍將持續執行翻修作業，預期每個機組可因此而增加 25-30 年的運轉年限。世界核能協會(World Nuclear Association, WNA)說明翻修加拿大重水式反應器(CANDU)的主要步驟包括⁴：更換燃料匣和蒸汽產生器、並提升儀控等輔助系統到最新的標準。一般而言機組翻修的成本低於新建機組，不過前者也曾出現超出預算的情形。WNA 統計顯示，未來將考慮執行翻修的機組包括 Bruce B 5-8 號機及 Darlington 1-4 號機，至於 Pickering B 5-8 號機，目前安大略電力公司傾向不再翻修而於執照到期後予以除役。

除了核能發電之外，加拿大的鈾礦生產也佔有世界重要的地位，根據 WNA 的報導⁵，該國曾是世界最大的鈾礦生產國，2009 年後被哈薩克(Kazakhstan)超越，但仍是第二大產國，其中最主要來源為薩克其萬省(Saskatchewan)，是目前世界上最大的鈾礦場，2014 年位於薩省之 Cigar Lake 礦場開始正式生產後，預期加拿大的生產量將顯著地提升，另估計鈾礦蘊藏量為 48.5 萬公噸，佔全世界總量之 18%，加國對於提供核原料，實具有不可磨滅的角色。圖 2 展示加拿大核能電廠及鈾礦場之分布狀況。

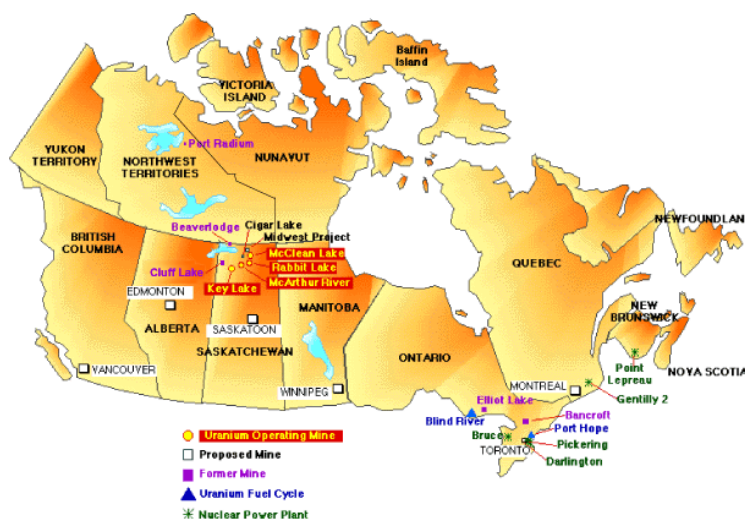


圖 2:加拿大核能電廠及鈾礦場分布圖

(資料來源: 世界核能協會網站⁵)

未來能源混比預測

除了前述的鈾礦之外，地廣人稀的加拿大，又蘊藏了豐沛的水力資源，根據 2013 年加拿大能源未來報告⁶，未來 20 年內，全國水力發電裝置容量仍將佔超過一半的比例，是電力最大的來源，而天然氣及風力發電的裝置容量，則將分別從 15%及 4%，提升到 22%及 9%，另外在生質能、太陽能、及地熱等三者加起來之電力容量配比，將由 2%以倍數方式提高到 4%。至於其他種形式的能源，包括：核能、煤、及石油等，在 2035 年時呈現不等的降低趨勢，以上各種能源變化之詳細數據如圖 3 所示。

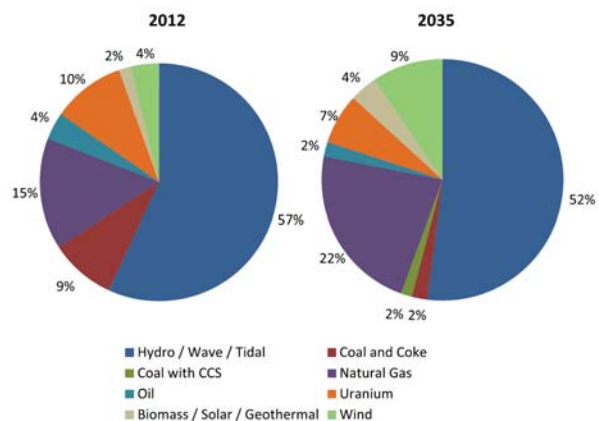


圖 3:加拿大能源配比變化圖

(資料來源: 加拿大能源會⁶)

另需注意加拿大各個省份因資源不同而有不同的因應策略，例如具有 18 座運轉中核能機組之安大略省(Ontario)，核能佔有所有發電裝置容量的 1/3，該省 2012 年的發電總實績，核能計發出 55%的電力，其餘能源則是由水力及天然氣來提供；而位於中部的薩克其萬省(Saskatchewan)及亞伯達省(Alberta)，傳統上是使用燃煤電力，然近期內將逐漸擴張天然氣的發電能量；最北部的努勒維持省(Nuvavut)及西北領土(Northwest Territory)多採用柴油發電；加拿大其他各省份則以水力發電為主。

在這份加拿大能源未來的報告中⁶，針對核能的部分特別指出，除了水力之外，核能是唯一提供基載電力而不會排放溫室氣體之能源，若機組翻修的成本可以控制在合理範圍，則價位上又可以與其他型式能源相抗衡。未來 20 年的預測中，核能機組裝置發電量預期僅微幅下降，然因部分機組將陸續執行翻修作業，加上預期不會有新增建的機組，故整體的比例呈現下降趨勢。因魁北克水力已宣布不翻修位於該省的 Gentilly 2 號機，故目前僅剩下安大略及新伯倫瑞克兩個省有運轉中之核能機組。

後福島事故之安全加強

安全運轉是所有國家核能工業界之最高優先度，正如所有具有核能發電國家一般，加拿大核能安全委員會(CNSC)於 2011 年 3 月 11 日發生日本福島第一核能電廠事故後，立即成立專案小組，針對境內核能電廠進行安全評估並於同年 10 月發表專案報告⁷，從這份報告中可以綜觀加拿大針對福島事故所採取的一系列做為。

首先在福島事故後立即做為包括：啟動位於首都渥太華的緊急運轉中心，以 24 小輪班的方式監看事故發展的狀況並收集早期性的評估報告，以提供正確資訊給加拿大政府相關單位。CNSC 並要求各核子設施持照者應立即對照本次事故之經驗，檢查各核能電廠救援設施之整備性(readiness)，此檢查需涵蓋地震預防、消防能力評估、後備電源、減緩氫氣效應及照射過燃料區之冷卻。另外亦建立專案小組來評估各電廠對於事故狀況之運轉、技術、法規要求符合性以及緊急應變計畫的妥適性。

依據前述專案小組的報告⁷，其再評估的範圍包括 7 項：確認廠外事件的強度、事故基準事故的適切性、考量超越基準事故的狀況、執行嚴重核子事故處理的情形、持照者的緊急應變計畫、加拿大全國性的核子緊急應變管理、及加拿大核能安全委員會的架構及管制流程。CNSC 報告也強調，檢視此 7 個事項的精神仍是以深度防禦(defense-in-depth)的策略為主，亦即必須確保第一線的防護和控制功能得以發揮，以便能利用實體屏蔽來確實保障放射性物質不被外釋；即使萬一失效，仍有適當的方法來偵側、補救、及改正，以保護大眾安全。

CNSC 專案小組最後的結論顯示加拿大核能電廠是安全的，其影響到民眾安全、健康或環境的風險是輕微的，專案小組並確認各電廠距離各海底板塊都相當遙遠，因此發生具威脅性地震的機會幾可忽略。至於其他專案小組所做出的改善建議，例如防止未經過濾的排放、提升氫氣及其他可燃氣之控制能力、設備及儀器之妥適性及存活性、核安及輻防法規之強化等事項，將可進一步合理地降低核子事故的風險。

加拿大核子反應器安全特性

目前除了加拿大擁有 CANDU 型反應器之外，其餘尚有韓國、阿根廷、羅馬尼亞、印度、巴基斯坦、及中國大陸等地具有同類型的核能機組。CNSC 動力反應器署長 Greg Rzentkowski 於第 6 屆核安全公約大會上⁸，報告了以上同屬於重水式反應器使用群對於福島事故後之改進措施。在他的報告中指出，韓國、阿根廷、羅馬尼亞等三國執行了歐盟的壓力測試(Stress Test)，其他國家則各自執行了獨立完整之安全評估。綜合而言，使用 CANDU 反應器的各核能電廠已增強對燃料的保護、防止爐心嚴重的受損、保護圍阻體的完整性、確保用過燃料池的冷卻及水位讀數、過濾式圍阻體排氣及嚴謹的緊急應變計畫與演習更進一步保護民眾的安全。

此外由加拿大 Bruce Power⁹對於 CANDU 型反應器的安全系統介紹(示意如圖 4)，可綜觀其安全特性，重點節錄如下：

- 兩套獨立且不同型式的安全停機系統：第一套是利用控制棒吸收中子的方式來停機，此系統平時位於反應器上方，當需要停機時可插入反應爐心中。另一套系統則是將硝酸釷(nitrate gadolinium)注入緩和劑中以增加中子吸收而停止核子反應。
- 反應器外圍具有容納放射性物質洩漏的真空空間，其周圍為 4 吋厚混凝土圍牆。在發生冷卻水系統大量洩漏事件時，此空間可容量 1 千 2 百萬公升的水/蒸汽，並在需要排放時，由高效率過濾器除去 99.9%的放射性物質。
- 具有緊急爐心冷卻水注入系統。
- 在喪失動力的情況下，可利用被動式的安全自然對流方式來保持一次冷卻水系統的冷卻功能。

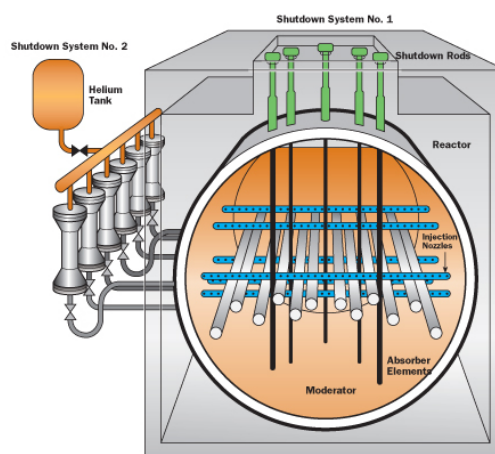


圖 4:CANDU 安全系統示意圖

(資料來源: Bruce Power 網站⁹)

核燃料後端處理規劃

加拿大之中低階核廢棄物之處置係由各電力公司及加拿大原子能公司(Atomic Energy Canada Limited, AECL)負責，目前廢棄物均暫存於各設施之地表位置。安大略電力公司(OPG)於 2005 年起在該公司所屬西部廢

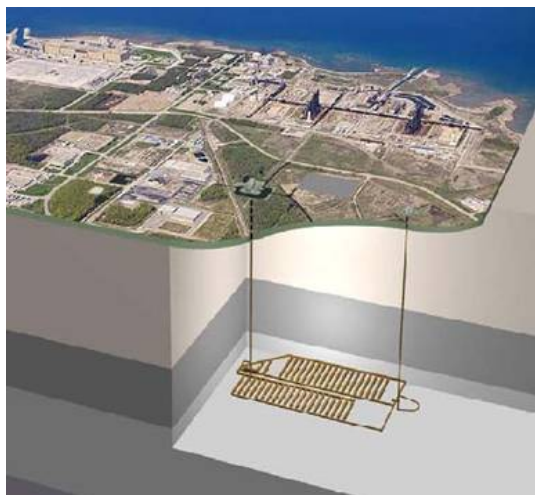


圖 5: OPG 深層地底儲存場概念圖
(資料來源: CNSC 網站¹⁰)

棄物處置場，規劃一座深層地底儲存場，預計可容納 20 萬立方公尺的中低階核廢棄物，此計畫已於 2011 年 4 月送出執照申請書給加拿大核能安全委員會(CNSC)審查，目前此項審查作業仍在進行中。預估在取得 CNSC 執照許可後，可望於 2018 年開始營運，以儲存位於安大略省 20 部機組(18 部運轉中，2 部永久停機)所產生之所有中低階核廢棄物。

至於在用過核子燃料之高階廢棄物處置方面，根據核子燃料廢棄物法之規定⁴，2002 年由加拿大電力公司及 ACEL 共同成立了加拿大核廢棄管理機構(Nuclear Waste Management Organization, NWMO)，主要職責為開發各種儲存及廢棄可行方案，並提供給政府決定，以後續實施處置作業。NWMO 於 2005 年公佈 3 種設計概念及技術選項，首先是在現有 7 個電廠廠址中延長乾式貯存設施的放置年限，NWMO 評估是可行的；其次是開發集中式的長期儲存設施，基本與 12 個已經在使用中的國家類似；最後的選項則是深層地底最終處置場，且必要時仍可以取出核子用過燃料再做處置。此一深層處置的方式，又被稱做是最佳階段式管理(Adaptive Phased Management)，已於 2007 年為加拿大政府所接受，而 NWMO 則於當年指出安大略、魁北克、新伯倫瑞克、或薩克其萬省需自願性設置此最終處置場。目前約有 21 個場址在 NWMO 的評估中，預計 5 年內會縮小範圍到最後 1-2 地點，而開始營運的時間預估為 2035 年。

核能使用之民意調查

加拿大核能協進會(Canadian Nuclear Association, CNA)的網站上¹¹顯示自 1987 年開始，便委託 Ipsos Reid 公司進行民眾對於各式能源及核能的支持度調查，2011 年起 CNA 委託另一家 Innovative Research 繼續進行調查。表 2 整理上述兩家民意調公司 2006 年到 2012 年加拿大民意對核能發電的調查結果。由其數字變化可以歸納出以下觀察：

- 加拿大全國性支持核能的比例，近年來呈現下降的趨勢，反對比率則維持超過 5 成的態勢。
- 加拿大各省因天然環境資源不同，對核能的態度呈現不一致的現象。其中安大略省是全國唯一支持度超過 5 成的省份，而魁北克則僅有不到 2 成的支持度。這正說明為什麼 19 部運轉中機組，就有 18 部位於安大略省，且未來將繼續進行機組翻修作業，延續核能發電；反之魁北克原僅有之 Gentilly 2 號機則由該省省長決定，提前於 2012 年停機且不進行原預定之翻修作業，目前 Gentilly 2 正過渡到除役過程中之安全儲存階段。
- 支持機組翻修作業支持度高於新建核能機組，此現象也符合現今加拿大核能機組僅考慮在使用執照到期後執行翻修的做法，原在三座場址擬新建 9 GW 容量的計畫則紛紛暫緩或中止。

表 2: 2006-2012 加拿大歷年調查支持與反對核能發電比例

(資料來源：加拿大核能協會網站¹¹)

月/年	調查機構	全國支持率	全國反對率	安大略支持率	魁北克支持率	支持新建機組	支持翻修機組	樣本數目
04/2006	Ipsos Reid	40%	58%	61%	22%	39%	57%	800
02/2007	Ipsos Reid	44%	54%	63%	18%	43%	60%	2123
01/2008	Ipsos Reid	47%	51%	65%	22%	48%	67%	2187
01/2009	Ipsos Reid	43%	53%	62%	19%	46%	64%	1156
03/2010	Ipsos Reid	43%	54%	56%	18%	46%	67%	1158
04/2011	Innovative Research	38%	56%	53%	17%	35%	53%	1012
05/2012	Innovative Research	37%	53%	54%	12%	33%	47%	1304

綜合結語

加拿大地大物博，在世界各國土地面積中，其大小僅次於俄羅斯，且加國天然資源豐富，能源方面除有充沛水力之外，還蘊藏化石及鈾等礦產，電力供應不但能自給自足，還能輸出到其他國家(如臨近的美國)，在此優渥的條件下，現今核能發電扮演的角色雖然僅佔整體電力之一成五左右，但加拿大在規劃長期整體能源混比及未來推展乾淨能源(如風力、天然氣取代煤炭等)的同時，核能仍是其多樣化能源選項中的一環。相對於我國土地面積狹小、天然資源貧瘠、且高度仰賴能源進口，加上政府減少排碳的承諾，此時更不應輕易放棄包含核能在內任何一項可以使用的能源。

與世界各擁有核能發電的國家相同，加拿大政府在日本福島事件發生後也迅速地因應並採取加強核能安全的措施，雖然核能安全管理主管機關(CSNC)專案小組最後的結論顯示加拿大核能電廠是安全的，對於民眾安全、健康或環境的風險是輕微的，且發生具類似日本那種威脅性地震的機會幾可忽略，然而從長期全國性民意對核能支持不到5成的調查結果顯示，政府的努力似乎並沒有產生太多的作用(除了具有九成以上核能機組所在的安大略省之外)。我國核能主管機關在因應福島事故後也執行類似之安全再評估及並獲得相同的結論，然而也面臨具大反對核能的民意壓力，兩個政府似都應該思考如何有效地傳遞正確的訊息給民眾，減輕大眾的疑慮。

加拿大中低階核廢棄物及用過核子燃料之處置原則上將採用地底深層儲存的方式，此方法與世界主要國家也類似，目前中低階核廢棄物處置場正積極由管制機關進行審查中，而最終處置場規劃開始運轉的時間為2035年，相當具有挑戰。我國未來或可以邀請加國專家，或是主管核廢棄物處置專責機構(NWMO)人員，彼此交換管制法規及實務經驗，吸取該國的長處，做為規劃我國核廢料處置的參考。

參考資料

1. Canada Nuclear Safety Commission, "Staff Integrated Safety Assessment of Canadian Nuclear Power Plants for 2013", June, 2014.
2. International Atomic Energy Agency, "Power Reactor Information System, United States of America", July, 2014.
3. Colin Hunt, "Nuclear Canada Yearbook 2013", Canada Nuclear Society, 2014.
4. World Nuclear Association, "Nuclear Power in Canada", updated May 2014.
5. World Nuclear Association, "Uranium in Canada". Update 26 June 2014.
6. National Energy Board, "Canada's Energy Future 2013", 2013.
7. Canada Nuclear Safety Commission, "CNSC Fukushima Task Force Report", October, 2011.
8. Greg Rzentkowski, "PHWR Group of Countries: Implementation of Lessons Learned from Fukushima Accident in CANDU Technology", Viena, Australia, April 1, 2014.
9. Bruce Power, "CANDU safety features".
(<http://www.brucepower.com/safety-first/candu-safety>)
10. Canada Nuclear Safety Commission, "Low- and Intermediate-level Radioactive Waste".
(<http://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/waste/low-and-intermediate-waste>)
11. Canadian Nuclear Association, "Studies & Reports - Public opinion reports". (http://www.cna.ca/studies_reports/public_opinion)