

# 緊急爐心冷卻系統

- 壹.功能
- 貳.系統概述
- 參.系統組件
- 肆.系統運轉

## 壹.功能

- A. **緊急爐心冷卻系統** (Emergency Core Cooling System, ECCS)，又稱安全注水系統 (Safety Injection System)，具有兩項功能，即在事故發生後能冷卻爐心，以及增加停機餘裕。
1. ECCS之主要功能，係在發生冷卻水流失事故 (Loss of Coolant Accident, LOCA) 之後，注入大量冷卻水，用以移除爐心衰變餘熱，避免爐心熔燬。
  2. ECCS之次要功能，在發生蒸汽管路斷裂時，藉注入高濃度硼液至核心，以增加停機餘裕。
- B. **ECCS系統**係以冷卻水流失事故 (LOCA)，射棒事故 (Rod Ejection Accident)，蒸汽管路斷裂事故 (Steamline Break Accident) 以及蒸汽產生器管束破裂事故 (S/G Tube Rupture) 為設計基準。LOCA範圍包括小管路斷裂或釋壓閥卡在全開位置，致使正常補充水系統無法補足流失的爐心冷卻水，以至最大管路瞬間完全斷裂之大型事故。射棒事故係假設控制棒驅動系統 (CRDM) 壓力管室突然斷裂，反應爐內外差壓使控制棒激射而出，瞬間加入正反應度，且爐水自斷裂處流失。蒸汽管路斷裂事故，包括大小管路嚴重程度不等之斷裂情況，其後果可能使一次系統爐水驟冷導致加入正反應度，並使圍阻體內壓力升高。蒸汽產生器管束破裂事故，不只使一次系統水大量流失，且二次系統遭受輻射污染或經蒸汽產生器 PORV 或真空泵污染外界。
- C. **在緊急事故之後**，ECCS系統之動作可分為三個階段，即：
- 注水階段 (Injection Phase)
  - 冷端管路再循環 (Cold Leg Recirculation Phase)
  - 熱端管路再循環 (Hot Leg Recirculation Phase)
1. **注水階段**  
事故發生後，ECCS將大量含硼水自燃料更換水儲存槽 (Refueling Water Storage Tank, RWST) 或蓄壓槽 (Accumulator) 經冷端管路注入爐心，其目的在使爐心重新為水淹沒並阻止任何反應度上升的趨勢，以免爐心受到進一步的損害。此階段為時相當短，一旦流失的爐水得到補充即算結束。
  2. **冷端管路再循環階段**  
當LOCA發生時，一次系統之水從斷裂口流出，凝結成水流入圍阻體內之再循環集水池 (Containment Recirculation Sump)，當RWST之水全部注入核心時，集水池也滿水了，此時ECCS自集水池取水經冷端管路打入爐心，再經管路破裂處流至集水池，構成一循環迴路。此階段之目的在移去爐心的衰變熱。若LOCA為最嚴重之冷端管路完全斷裂，此時衰變熱主要靠爐水蒸發來移除，ECCS之功能則在補充因蒸發而減少的水量。
  3. **熱端管路再循環階段**  
冷端管路再循環階段數小時後，ECCS經RCS熱端管路注入冷卻水，冷卻爐心上部，使爐心上部硼酸結晶溶解，以免阻礙水流或蒸汽通道，以後每一時間冷端與熱端再循環轉換一次。

## 貳.系統概述

- A. **ECCS系統**，也就是安全注水系統 (SIS)，包括三個支系統，即低壓注水系統，高壓注水系統及蓄壓槽。
1. **低壓注水系統**主要由餘熱移除系統 (Residual Heat Removal System, RHR) 所組成。RHR系統主要在起動或停機時，執行排除餘熱的工作，緊急時則成為ECCS的一部份。
  2. **高壓注水系統**主要由離心充水泵 (Centrifugal Charging Pump, CCP)、硼注入槽 (Boron Injection Tank, BIT) 以及相關管閥等所組成。雖然CCP平時為爐水控制系統 (CVCS) 的重要組件，緊急時則與CVCS隔離而成為ECCS的一部份。
  3. **三個蓄壓槽**及相關之管閥組成ECCS之中壓支系統，一旦反應爐壓力低於蓄壓槽壓力，槽中大量含硼水立即注入爐心不需外來動力。此外燃料更換水儲存槽 (Refueling Water Storage Tank, RWST) 亦是ECCS很重要的一部份。在注水階段 (Injection Phase)，ECCS之

水源均來自RWST。

反應爐槽中之水經管路破裂處流至圍阻體再循環集水池，再由RHR或/及圍阻體噴灑系統（Containment Spray System）抽取循環使用。

4. **在事故發生時**，無需任何操作員手動操作，所有SI相關泵自動由RWST取水自冷端管路注入爐心，一旦RWST水位逐漸降至預設之過低水位警報點，RHR之圍阻體再循環集水池進口閥自動打開，操作員關閉RWST到RHR進口閥，注水階段即告結束，冷端管路再循環階段即開始。CCP則仍繼續自RWST取水，操作員可手動將CCP進口改自RHR熱交換器下游取水。

- B. **ECCS系統**須能提供足夠的含硼水以滿足各項安全規章（Safety Criteria），故在任何情況下最少須有一台RHR泵及一台CCP在接受到SI訊號時正常起動運轉，並且所有三台蓄壓槽均需能供水至冷端管路。  
為了保證最少各有一台RHR泵及CCP在事故後能正常起動運轉，故有兩完全獨立的供電系統及起動訊號系統。兩個4.16kV緊急匯流排分自不同的外界電源受電，若外界電源中斷，則由兩台緊急柴油發電機分別供電。

### C. 低壓注水系統（LHSI）

#### 1. 功能

- a. LHSI（即RHR）在注水階段能自RWST泵送高流量的含硼水以確保爐心能迅速再為爐水淹蓋。
  - b. LHSI在再循環階段能自圍阻體再循環集水池取水，不斷的循環泵送至冷端管路或熱端管路，以移除爐心的餘熱（衰變熱）。
  - c. LHSI在再循環階段能不斷的運轉，以提供CCP的進口水源。
  - d. LHSI在再循環階段能冷卻自再循環集水池抽取的含硼水，成為自圍阻體中移除熱量的主要工具。
2. **為達成上述功能**，LHSI（RHR）有兩台RHR泵和兩台RHR熱交換器。當電廠正常運轉發電時，所有RHR的各閥均按緊急情況時應有之位置開關妥當，一旦接到緊急起動訊號，不必另行開關。
  3. **兩台RHR泵**分別自兩緊急匯流排受電，於接受安全注水訊號（SIS）時自動起動，自RWST取水泵送至RCS冷端管路。RWST水位逐漸降低至觸動過低水位設定點時，RHR之再循環集水池進口閥自動打開，RHR熱交換器之核機冷卻水（CCW）進口閥HV—152、252需手動予以打開。
  4. **當RHR再循環集水池**進口閥自動打開後，操作員須立即手動打開HV-105、HV-205將CCP進口改至RHR熱交換器出口。且關閉RWST至RHR之進口閥（HV-8、HV-5）。
  5. **兩台RHR泵**之出口在RHR熱交換器下游有跨接管連接，跨接管上有電動隔離閥HV-11、HV-14，正常時開啟，以提高可靠性。冷端再循環時關閉，以確保獨立性。在熱端管路再循環階段則應手動打開，RHR經此跨接管餉入冷卻水迴路1和2之熱端。

### D. 高壓注水系統

#### 1. 功能

- a. HHSI（CCP）可經由注硼槽（BIT）將高濃度硼酸液注入爐心。
  - b. 當小型LOCA發生時，RCS系統仍在高壓狀態，以致LHSI（RHR）系統無法打水入RCS時，HHSI能不斷供給高壓冷卻水流。
  - c. HHSI的水量加上LHSI及蓄壓槽的水量能保證爐心可在最短時間內重新為水淹蓋。
2. **當電廠正常運轉時**，一台CCP自CVCS容積控制槽（VCT）取水泵送至正常充水管路及RCP軸封系統，一台CCP置於後備狀態，另一台CCP可做為前兩台任一失效時後備使用。  
當接到SIS信號時，第一台、第二台CCP自動起動並與CVCS互相隔離，單獨從RWST取水。出口經過BIT由RCS冷端管路注入，BIT並自其再循環系統中隔離。正常充水管路雖自CCP隔離，但CCP仍供水至RCP軸封系統，以免RCP損壞。
  3. **電廠正常運轉時**，注硼槽（BIT）與CCP及RCS的連接都由兩組並聯的閥隔離。BIT中儲有高濃度硼酸水。BIT之再循環系統，其主要組件為兩台再循環泵及一個調節槽（Surge Tank）。兩台再循環泵之一自調節槽吸取硼酸水，泵送至BIT，再流回調節槽構成一迴路；本循環系統視需要才起動，不需要連續運轉。

### E. 蓄壓槽（Accumulator）

#### 1. 功能

- 發生大型LOCA時，RCS壓力急驟降低蓄壓槽能即刻供給大量含硼水，其特點是在不需任何起動訊號，不須等待水泵起動，亦不受電力喪失的影響且動作迅速。
- 發生事故時，三台蓄壓槽均應能發揮其功能。當電廠正常運轉時，蓄壓槽之出口關斷閥全開，兩個串聯的止回閥可防止高壓RCS系統倒灌回蓄壓槽。出口關斷閥僅在停機降壓或起動加壓時才關閉。
- 蓄壓槽以氮氣（N<sub>2</sub>）加壓，當RCS壓力低於氮氣壓力時，氮氣急劇膨脹壓迫槽中所存水量，經止回閥注入爐心。

## 參. 系統組件

### A. LHSI（RHR）系統

1. RHR泵  
RHR泵為單級直立式離心泵，自底部吸水，側部排水，由感應馬達帶動。機械式軸封並由核機冷卻水（CCW）冷卻。備有最小流量旁通管路，以防泵過熱損壞。
2. 冷端管路注水關斷閥  
此閥為電動閘閥，位於注水集管上游，RHR熱交換器下游。此閥常在全開位置。
3. 熱端管路注水關斷閥  
此閥為電動閘閥，經常閉鎖在全關位置。
4. RWST出口關斷閥  
此閥為電動閘閥，於兩RHR迴路之RWST出口管路上，此閥常在全開位置。事故後，當圍阻體再循環集水池進口閥自動打開之後，須由操作員手動關閉。
5. 圍阻體再循環集水池出口閥  
此閥為電動閘閥，常在全關位置，當SI訊號與RWST過低水位訊號同時出現時，此閥自動打開。BH-HV-101及BH-HV-201位於包封室內，以防集水池中帶輻射性的水經此閥Packing洩漏而污染輔助廠房。
6. 跨接管關斷閥  
此閥為電動閘閥，常在全開位置，於注水階段可使任一RHR泵經兩迴路注入RCS。在冷端管路再循環階段由操作員關閉，以保持RHR迴路之獨立性。在熱端管路再循環階段由操作員再打開，以供水至熱端管路注水集管。
7. 兩CCP迴路之冷端及熱端注水管路下游各分為三路，分別注入RCS三迴路。集管下游三條管路上各有手動針閥，僅於試運轉期間平衡三迴路注水流量時調整用，正常運轉以後並不操作。RHR熱端管路注水集管下游僅分成二路，分別注入RCS第一及第二迴路的熱端。

## B. HHSI (CCP) 系統

1. CCP係水平式離心泵共3台，經一齒輪箱，由感應馬達帶動。每泵均有潤滑及機械式軸封冷卻裝置。潤滑系統熱交換器由CCW冷卻。最小流量閥經常開啟以防泵過熱受損，此閥於SI訊號出現時關閉。
2. 壓力試驗排量式泵  
此泵無安全功能，僅用於蓄壓槽充水並維持適當水位及RCS壓力試驗。水源來自RWST。
3. 注硼槽  
注硼槽基本上是一充滿硼液之壓力槽。
4. 注硼調節槽（BIT Surge Tank）  
當BIT因溫度變化，以至水容積增減時，由調節槽來容納或補充。
5. 注硼槽再循環泵  
兩台再循環泵自調節槽將硼液打至BIT再回到調節槽，以使BIT內硼液之濃度與溫度均勻。
6. RHR至CCP進口閥  
此閥位於RHR熱交換器下游與CCP上游，平常關閉，於安全注水階段結束轉變至冷端管路再循環階段時開啟。
7. BIT隔離閥  
BIT進口及出口隔離閥皆由兩並聯之電動閥組成。
8. RWST至CCP進口隔離閥  
此二閥並排，平常在關閉位置，於接到SI訊號時自動開啟。二閥分屬二獨立電源，故不受單一故障的影響。
9. VCT至CCP進口隔離閥  
此二閥串聯，通常位於開啟位置，於接到SI訊號或VCT低水位信號時自動關閉。二閥分屬二獨立電源，即使一閥因故障無法關閉，另一閥仍可關閉。
10. CCP最小流量閥  
三台CCP有三個並聯的最小流量閥，此三閥之下游匯流於一管，有一串聯最小流量閥BG-HV-30，前面三閥與後面一閥分屬獨立的電源。
11. 正常充水隔離閥  
此二閥串聯，通常位於開啟狀態，於接到SI訊號時關閉。

## C. 蓄壓槽系統

1. 蓄壓槽  
三台獨立之蓄壓槽分別連接至RCS三個迴路，電廠正常運轉時，蓄壓槽出口隔離閥全開，僅靠二止回閥阻擋RCS高壓，當RCS壓力低於蓄壓槽上部氮氣壓力時，氮氣迫使含硼水流入RCS，其中進入速度由RCS降壓之速率決定。蓄壓槽氮氣體積受水位高低的影響。氮氣來自外界氮氣瓶，正常運轉時蓄壓槽與氮氣瓶隔離。氮氣壓力可隨時加以調整。水量由壓力試驗泵自RWST補充，亦可經適當管路洩回RWST或EDT。
2. 蓄壓槽出口隔離閥  
此電動閥通常在全開位置，當RCS壓力高時，此閥即使在關閉位置亦會自動開啟。當SI訊號出現時，此閥能自動開啟，且無法手動關閉。當停機降載時，此閥可予以關閉，以免RCS壓力低於氮氣壓力時，引起蓄壓槽不必要之動作。在所有的運轉情況下，隔離閥之電源均在off位置。當起動時RCS壓力超過高時，操作員在現場送電，由控制室打開，打開後把電源切開。正常停機時，當RCS壓力低，則再次送電，關閉該閥並將電源再次切離，以防誤操作。

## D. 燃料更換水儲存系統

1. 更換燃料水儲存槽 (RWST)
  - a. RWST係直立式圓柱水泥槽體，內襯不銹鋼板製成，當反應爐運轉時，槽內水量確保爐心在發生LOCA或更換燃料時，有足夠之停機餘裕。
  - b. RWST係被動元件，且僅於發生LOCA後短時間內須要用到，故不必考慮採用重複性 (Redundancy) 設計。RWST直通大氣，有溢流管及洩水管通液體廢料處理系統。RWST並有取樣系統，定期取樣分析水質，若水質不佳，則須經燃料池淨化系統 (Fuel Pool Cleanup system) 移除雜質。
  - c. RWST之水位指示顯示在主控制盤上，並有高水位警報提醒操作員避免溢流；低水位警報，提醒運轉人員注意RWST水位已降低到Tech Spec之要求。
2. 正常運轉時，RWST可用來測試RHR，圍阻體噴灑泵和添加劑噴吸器(Additive Eductors)，測試流量經由這些被測元件最小流量閥流回RWST。
3. RWST在熱停機或冷停機期間雖然不用，但仍然處於可用狀態。

## 肆. 系統運轉

### A. 機組起動

起動時，CCP置於CVCS系統中運轉。RHR在RCS壓力、溫度到達以後置於備用狀態，其進口改由RWST。當RCS壓力超過蓄壓槽壓力時，蓄壓槽出口隔離閥開關先行送電，由操作員於主控制盤打開然後再將電源切開。當RCS壓力超過SI復歸壓力時，SI訊號自動復歸。在此之前操作員須隨時注意，一旦發生LOCA必須手動起動SI訊號，因此時ECCS處於閉鎖狀態。

### B. 機組停機

機組停機，RCS壓力低於閉鎖SI訊號設定時SI訊號須閉鎖。RCS壓力過低蓄壓槽出口隔離閥須先行送電再由操作員於主控制盤關閉，關閉後再將電源切開。

### C. 機組正常發電

此時ECCS處於後備狀態 (Standby Mode)。RHR泵停轉，RHR由RWST來之進口閥全開。BIT進口及出口閥全關，BIT再循環泵視需要自BIT將硼液泵送至調節槽。蓄壓槽注水管路除止回閥外各閥全開，CCP自VCT取水，其RWST進口閥LV-115B及LV-115D須全關。

### D. 發生緊急事故時

#### 1. 注水階段

##### a. 安全注水發生後：

- I. 二台充水泵起動，充水泵入口由VCT轉變為RWST取水。
  - II. 正常充水流程隔離。
  - III. BIT再循環系統停止。
  - IV. 充水泵從RWST取水經BIT進入RCS冷端。
  - V. 當RCS壓力降至蓄壓槽壓力時，蓄壓槽開始注水進入RCS冷端。
  - VI. RHR泵起動再循環運轉，一直至RCS壓力降至RHR水頭壓力才由RWST取水注入RCS。
- 安全注水階段ECCS設備由RWST取水注入RCS冷端，當RWST水位降低，圍阻體再循環集水池水位上升，RWST水位達到低—低水位時，RHR泵自動轉換為由圍阻體再循環集水池取水，從此進入冷端再循環階段。
- 倘若事故判明為蒸汽管路斷裂，ECCS之動作與LOCA完全相同，即使RCS並未失去任何水量，然而由於RCS急冷，體積收縮以致RCS壓力急降，調壓槽水位降低。此時CCP經BIT打入高濃度硼液，會逐漸使調壓槽水位恢復。
- 倘若發生小型LOCA，RCS之壓力可能仍相當高，為了避免高溫高壓狀態可能使破裂情況加劇，必須儘快將溫度壓力降下來，此時可利用蒸汽排放系統 (Steam Dump System) 來加快降溫的速度。當RCS溫度降低時，須將蓄壓器出口隔離閥關閉。RCS溫度壓力降至RHR可有效運用時，按正常停機程序操作。

#### 2. 冷端管路再循環階段

當RWST過低水位，RHR自動改自再循環集水池取水時，注水階段結束冷端管路再循環階段開始。此階段開始之前，SI訊號須加以復歸 (Reset)。

#### 3. 熱端管路再循環階段

在此階段圍阻體再循環集水池經由RHR泵、RHR熱交換器、CCP注入RCS熱端管路，由爐心上部倒流以移走衰變熱，然後經由RCS斷裂處再

流回再循環集水池。

熱端再循環轉換完成後，所有ECCS泵（RHR、CSS和CCP）仍然從再循環集水池取水，此時有兩串獨立的高壓注水和一串低壓注水，RHR熱交換器將集水池的水溫降低再注入RCS熱端管路。

當電廠進行清理和復原工作時，冷端再循環與熱端再循環每12小時轉換一次。此時必須密切的取樣分析硼酸濃度不可過低，可以使用緊急加硼操作來保持硼酸的濃度。