



模型报告

等所模型梳理

Tritium cycle model review for Plasma Institute

编写人： 蒋应伍

部门： CFEDR 部门

时间： XXXX

1. 模型

氦燃料循环示意图如下所示：

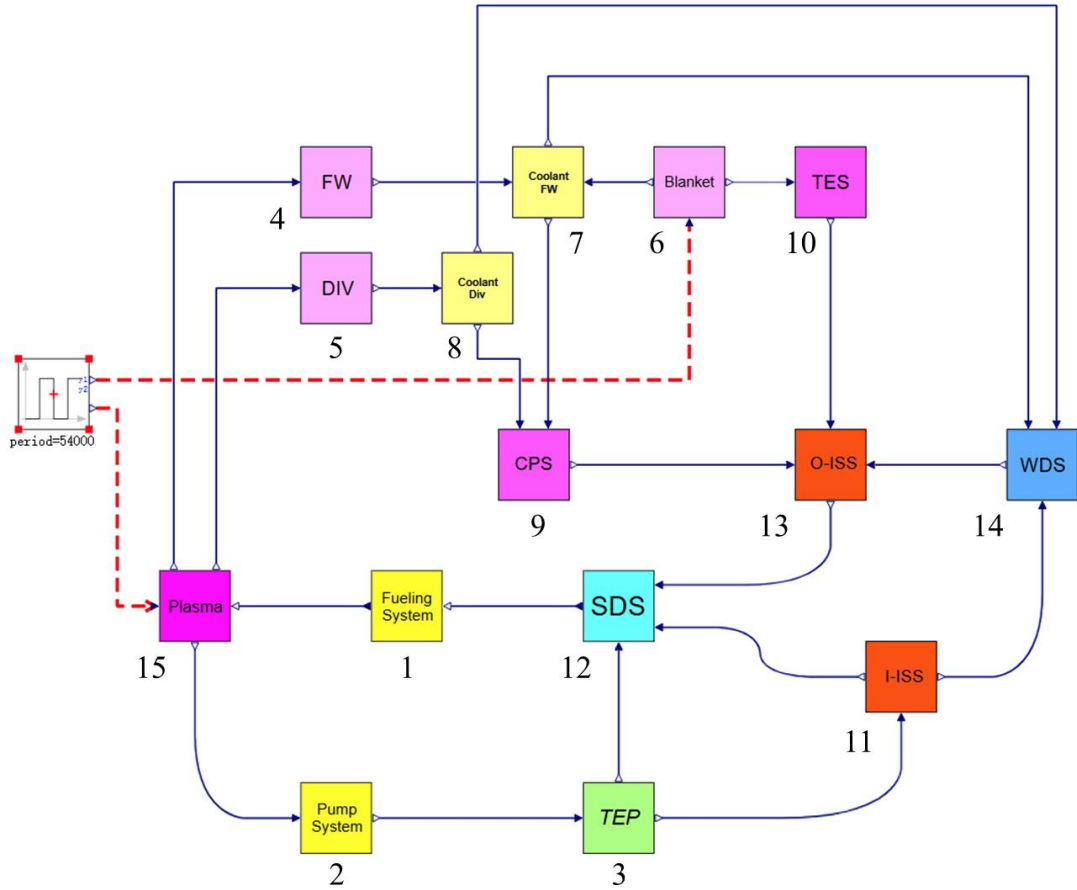


图 1-1 内外氦循环+WDS 系统示意图

2. 控制方程

根据上述模型示意图，其中共考虑 14 个物理模块，分别是加料系统、粗抽泵、TEP、第一壁、偏滤器、包层、第一壁冷却水、包层冷却水、冷却水净化系统、TES、I-ISS、SDS、O-ISS、WDS 和等离子体。其中， f_{i-j} ：从模块 i 到模块 j 份额， T_i ： i 系统中氦滞留时间， λ ：衰变常数， ε_i ： i 系统中非放损失比例。

其控制方程具体如下（由等离子体燃烧反推）：

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{N_{flux}}{f_e \beta} + \lambda I_1 - (1 + \varepsilon_1) \frac{I_1}{T_1} - \lambda I_1 \quad (2-1)$$

(我觉得少项: 应该是 $\frac{dI_1}{dt} = (\frac{N_{flux}}{f_e \beta} + \lambda I_1 + \varepsilon_1 \frac{I_1}{T_1}) - (1 + \varepsilon_1) \frac{I_1}{T_1} - \lambda I_1$)

其中, $I_1(\text{kg})$ 是加料系统中氙滞留量, $N_{flux}(\text{kg/s})$: 等离子体中氙燃烧消耗速率, $f_e (\%)$: 燃料注入系统加料效率, $\beta (\%)$: 等离子体燃烧效率。具体参数如下:

表 A-1 燃料注入系统 (FS)

序号	参数名称	值
1	平均滞留时间	0.5h
2	放射性损失率	6.4e-6
3	非放射性损失率	1e-4
4	N_{flux}	9.60984g/h (1.5GW)
5	运行周期	3h
6	占空比	0.5
7	燃料注入系统加料效率 $f_e (\%)$	50
8	等离子体燃烧率 $\beta (\%)$	6

$$\frac{dI_2}{dt} = f_{15-2} \frac{I_{15}}{T_{15}} - (1 + \varepsilon_2) \frac{I_2}{T_2} - \lambda I_2 \quad (2-2)$$

其中, $I_2(\text{kg})$: 泵抽系统中氙滞留量, $f_e (\%)$: 燃料注入系统加料效率, $\beta (\%)$: 等离子体燃烧率。具体参数如下:

表 A-2 泵抽系统 (PS)

序号	参数名称	值
1	平均滞留时间	0.17h
2	放射性损失率	6.4e-6
3	非放射性损失率	1e-4
4	铺底量	640g
5	处理能力	2.4m³/h
6	从等离子体进入粗抽份额 f_{15-2}	0.9998

$$\frac{dI_3}{dt} = \frac{I_2}{T_2} - (1 + \varepsilon_3) \frac{I_3}{T_3} - \lambda I_3 \quad (2-3)$$

其中, I_3 (kg): TEP 系统中氚滞留量。具体参数如下:

表 A-3 排灰气处理系统 (TEP)

序号	参数名称	值
1	平均滞留时间	2h
2	放射性损失率	6.4e-6
3	非放射性损失率	1e-4
4	处理能力	1.8m ³ /h (0.9=2*0.45)

$$\frac{dI_4}{dt} = f_{15-4} \frac{I_{15}}{T_{15}} - (1 + \varepsilon_4) \frac{I_4}{T_4} - \lambda I_4 \quad (2-4)$$

其中, I_4 (kg): 第一壁中氚滞留量。具体参数如下:

表 A-4 第一壁 (FW)

序号	参数名称	值
1	平均滞留时间	0.28h
2	放射性损失率	6.4e-6
3	非放射性损失率	0
4	最大氚盘存量	0.804g (0.402*2)
5	从等离子体到第一壁中份额 f_{15-4}	1e-4

$$\frac{dI_5}{dt} = f_{15-5} \frac{I_{15}}{T_{15}} - (1 + \varepsilon_5) \frac{I_5}{T_5} - \lambda I_5 \quad (2-5)$$

其中, I_5 (kg): 偏滤器中氚滞留量。具体参数如下:

表 A-5 偏滤器 (DIV)

序号	参数名称	值
1	平均滞留时间	0.28h
2	放射性损失率	6.4e-6

3	非放射性损失率	0
4	从等离子体到偏滤器中份额 $f_{15.5}$	$1e-4$

$$\frac{dI_6}{dt} = N_{flux} \cdot TBR - (1 + \varepsilon_6) \frac{I_6}{T_6} - \lambda I_6 \quad (2-6)$$

其中, I_6 (kg): 包层中氚滞留量, TBR: 氚增值比。具体参数如下:

表 A-6 包层 (BZ)

序号	参数名称	值
1	平均滞留时间	24h
2	放射性损失率	$6.4e-6$
3	非放射性损失率	0
4	TBR	1.1
5	最大氚盘存量	67.238g (33.619×2)
6	渗透速率	38g/day

$$\frac{dI_7}{dt} = \frac{I_4}{T_4} + f_{6-7} \frac{I_6}{T_6} - (1 + \varepsilon_7) \frac{I_7}{T_7} - \lambda I_7 \quad (2-7)$$

其中, I_7 (kg): 第一壁冷却水中氚滞留量。具体参数如下:

表 A-7 第一壁冷却剂回路 (CP)

序号	参数名称	值
1	平均滞留时间	24h
2	放射性损失率	$6.4e-6$
3	非放射性损失率	$1e-4$
4	包层泄露至第一壁冷却剂份额 f_{6-7}	0.05

$$\frac{dI_8}{dt} = \frac{I_5}{T_5} - (1 + \varepsilon_8) \frac{I_8}{T_8} - \lambda I_8 \quad (2-8)$$

其中, I_8 (kg): 偏滤器冷却水中氚滞留量。具体参数如下:

表 A-8 偏滤器冷却剂回路 (CP)

序号	参数名称	值
1	平均滞留时间	24h
2	放射性损失率	6.4e-6
3	非放射性损失率	1e-4

$$\frac{dI_9}{dt} = f_{7-9} \frac{I_7}{T_7} + f_{8-9} \frac{I_8}{T_8} - (1 + \varepsilon_9) \frac{I_9}{T_9} - \lambda I_9 \quad (2-9)$$

其中, I_9 (kg): 冷却水净化系统中氚滞留量。具体参数如下:

表 A-9 冷却剂净化系统 (CPS)

序号	参数名称	值
1	平均滞留时间	48h
2	放射性损失率	6.4e-6
3	非放射性损失率	1e-4
4	铺底量	200g
5	处理能力	3kg/s
6	第一壁冷却剂中氚被净化份额 f_{7-9}	0.9999
7	偏滤器冷却剂中氚被净化份额 f_{8-9}	0.9999

$$\frac{dI_{10}}{dt} = f_{6-10} \frac{I_6}{T_6} - (1 + \varepsilon_{10}) \frac{I_{10}}{T_{10}} - \lambda I_{10} \quad (2-10)$$

其中, I_{10} (kg): TES 系统中氚滞留量。具体参数如下:

表 A-10 氚提取系统 (TES)

序号	参数名称	值
1	平均滞留时间	12h
2	放射性损失率	6.4e-6
3	非放射性损失率	1e-4
4	铺底量	200g
5	处理能力	2.54mol/h(1.27)
6	包层中氚提取份额 f_{6-10}	0.95

$$\frac{dI_{11}}{dt} = f_{3-11} \frac{I_3}{T_3} - (1 + \varepsilon_{11}) \frac{I_{11}}{T_{11}} - \lambda I_{11} \quad (2-11)$$

其中， I_{11} (kg): I-ISS 系统中氙滞留量。具体参数如下:

表 A-11 内同位素分离系统 (I-ISS)

序号	参数名称	值
1	平均滞留时间	6h
2	放射性损失率	6.4e-6
3	非放射性损失率	1e-4
4	铺底量	300g
5	最大氙盘存量	50mol
6	处理能力	0.504m ³ /h (0.252=0.28*0.9)
7	(DIR) TEP 到 I-ISS 份额 f_{3-11}	0.15

$$\frac{dI_{12}}{dt} = f_{3-12} \frac{I_3}{T_3} + f_{11-12} \frac{I_{11}}{T_{11}} + f_{13-12} \frac{I_{13}}{T_{13}} - (1 + \varepsilon_{12}) \left(\frac{N_{flux}}{f_e \beta} + \lambda I_1 \right) - \lambda I_{12} \quad (2-12)$$

其中， I_{12} (kg): SDS 系统中氙滞留量。具体参数如下:

表 A-12 燃料储存与输运系统 (SDS)

序号	参数名称	值
1	放射性损失率	6.4e-6
2	非放射性损失率	1e-4
3	最大氙盘存量	-
4	处理能力	-
5	TEP 到 SDS 份额 f_{3-12}	0.85
6	I-ISS 回收至 SDS 份额 f_{11-12}	0.99999999
7	O-ISS 回收至 SDS 份额 f_{13-12}	1

$$\frac{dI_{13}}{dt} = f_{9-13} \frac{I_9}{T_9} + f_{10-13} \frac{I_{10}}{T_{10}} + f_{14-13} \frac{I_{14}}{T_{14}} - (1 + \varepsilon_{13}) \frac{I_{13}}{T_B} - \lambda_{13} I_{13} \quad (2-13)$$

其中, I_{13} (kg): O-ISS 系统中氙滞留量。具体参数如下:

表 A-13 外同位素分离系统 (O-ISS)

序号	参数名称	值
1	平均滞留时间	6h
2	放射性损失率	6.4e-6
3	非放射性损失率	1e-4
4	铺底量	20g
5	处理能力	27L/h(13.5=15*0.9)
6	从 CPS 到 O-ISS 份额 f_{9-13}	1
7	从 TES 到 O-ISS 份额 f_{10-13}	1
8	从 WDS 到 O-ISS 份额 f_{14-13}	1

$$\frac{dI_{14}}{dt} = f_{7-14} \frac{I_7}{T_7} + f_{8-14} \frac{I_8}{T_8} + f_{11-14} \frac{I_{11}}{T_{11}} - (1 + \varepsilon_{14}) \frac{I_{14}}{T_{14}} - \lambda_{14} I_{14} \quad (2-14)$$

其中, I_{14} (kg): WDS 系统中氙滞留量。具体参数如下:

表 A-14 水除氙系统 (WDS)

序号	参数名称	值
1	平均滞留时间	48h
2	放射性损失率	6.4e-6
3	非放射性损失率	1e-4
4	铺底量	1000g
5	处理能力	7.4*10 ¹³ Bq/day
6	从第一壁冷却剂到 WDS 份额 f_{7-14}	1e-4
7	从偏滤器冷却剂到 WDS 份额 f_{8-14}	1e-4
8	从 I-ISS 到 WDS 份额 f_{11-14}	1e-8

$$\frac{dI_{15}}{dt} = \frac{N_{flux}}{f_e \beta} - \frac{I_{15}}{T_{15}} - N_{flux} - \lambda I_{15} \quad (2-15)$$

其中, I_{15} (kg): 等离子体中氙滞留量, N_{flux} (kg/s): 等离子体中氙燃烧消耗速率。具体参数如下:

表 A-14 等离子体 (Plasma)

序号	参数名称	值
1	N_{flux}	9.60984g/h (1.5GW)
2	氙燃烧比	0.06
3	加料效率	0.5
4	放射性损失率	6.4e-6