

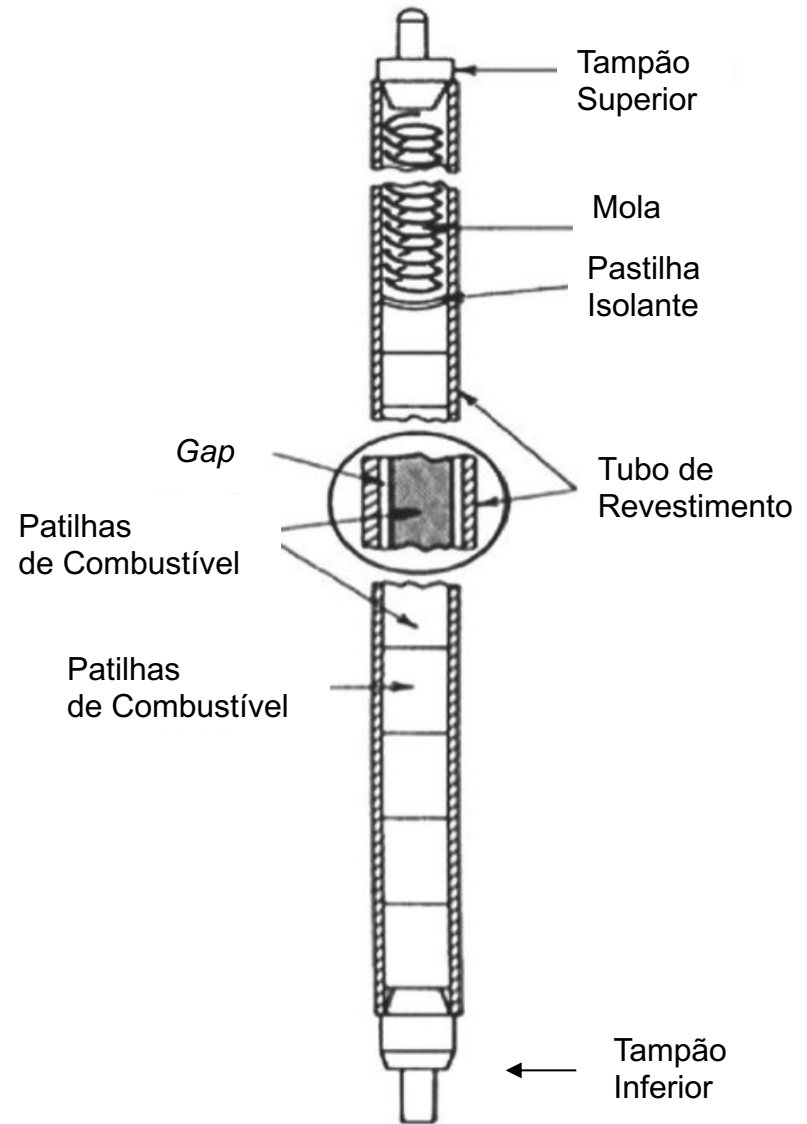
ANÁLISE DE DESEMPENHO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR

Antonio Teixeira e Silva e Claudia Giovedi

Novembro 2023

MÓDULO 6

FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE VARETAS DE COMBUSTÍVEL

VARETA DE COMBUSTÍVEL**COMPONENTES:**

- Tubo de Revestimento
- Tampões de Extremidades (Superior e Inferior)
- Pastilhas Isolantes (Al_2O_3)
- Pastilhas de Combustível (UO_2)
- Mola
- Gás de enchimento

FRAPCON: UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA O ESTUDO DOS COMPORTAMENTOS TÉRMICO E MECÂNICO DE VARETAS DE COMBUSTÍVEL DE ÓXIDOS EM ALTAS QUEIMAS

*FRAPCON-3: A COMPUTER CODE FOR THE STEADY-STATE, THERMAL
MECHANICAL BEHAVIOR OF OXIDE FUEL RODS FOR HIGH BURNUP*

G. A. Berna - Consultor

C. E. Beyer - Pacific Northwest National Laboratory

K. L. Davis - Idaho National Engineering and Environmental Laboratory

D. D. Lanning(b) - Pacific Northwest National Laboratory

Dezembro 1997

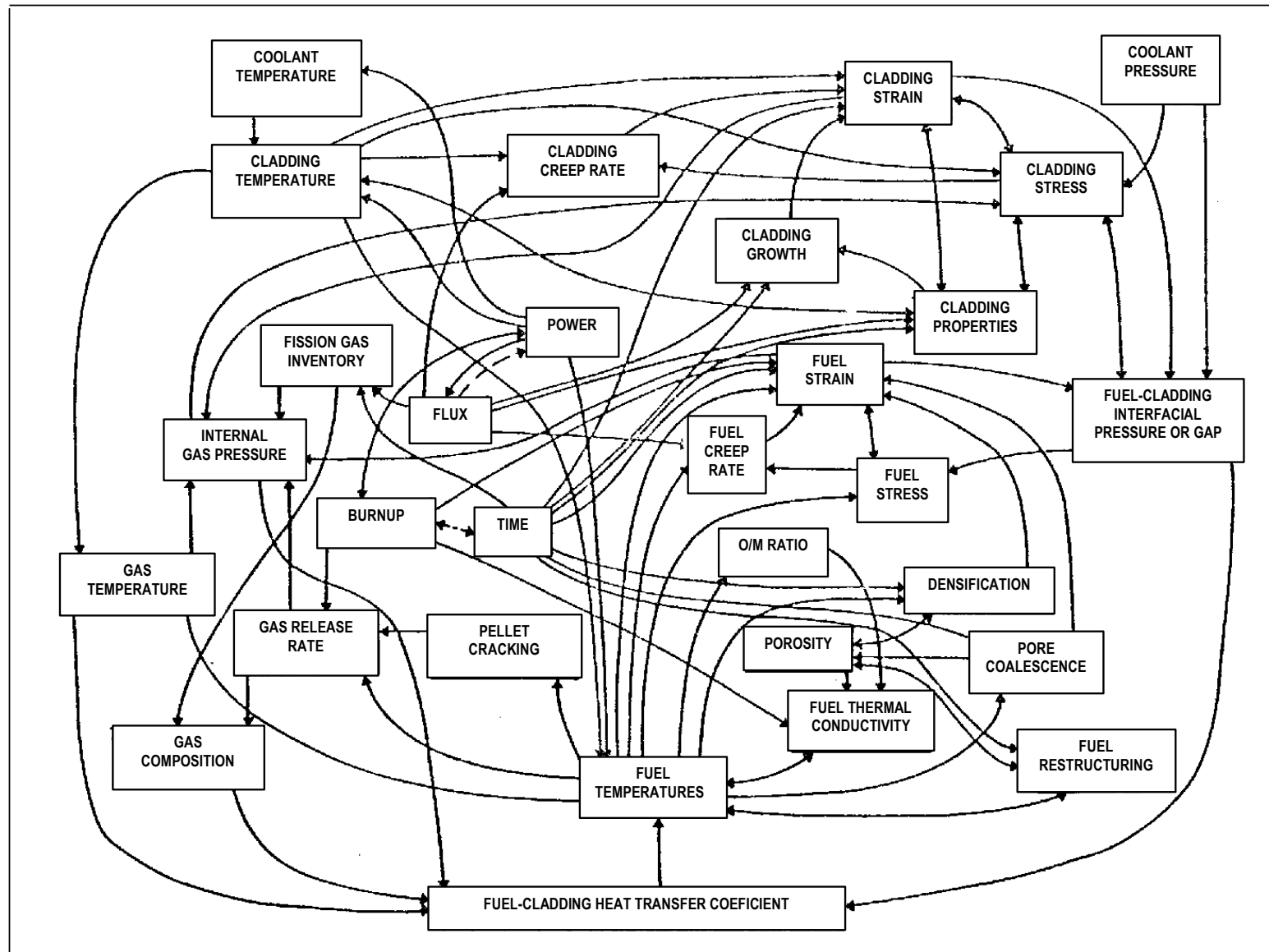
Preparado por

U.S. Nuclear Regulatory Commission

Pacific Northwest National Laboratory

Richland, Washington 99352

NUREG/CR - 6534 Volume 2 - PNNL-11513



O programa computacional (código) FRAPCON (*A Computer Code for the Calculation of Steady-State, Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup*) é uma ferramenta analítica que calcula o comportamento sob irradiação de uma vareta combustível LWR, quando as variações de potência e as condições de contorno são suficientemente lentas para que o termo regime permanente seja aplicado. Isto inclui situações tais como longos períodos a potência constante e rampas lentas de potência que são típicas da operação normal de um reator nuclear.

O FRAPCON calcula a variação no tempo de todas as variáveis significativas da vareta combustível, incluindo as temperaturas no combustível e no revestimento, as deformações e a oxidação no revestimento do combustível, a densificação, o inchamento, a liberação de gases no combustível e a pressão na vareta.

Além disso, o código é projetado para gerar as condições iniciais para a análise de transientes da vareta combustível com o programa computacional (código) FRAPTRAN.

O código FRAPTRAN (*Fuel Rod Analysis Program Transient*) é um programa computacional em linguagem FORTRAN desenvolvido pela US NRC para calcular os comportamentos térmico e mecânico em regime de transiente de varetas combustíveis de LWR.

O FRAPTRAN é utilizado para avaliar o comportamento do combustível durante transientes de potência e de refrigeração do reator, tais como acidentes de reatividade e acidentes de perda de refrigerante até queimas de 65 GWd/MTU.

O FRAPTRAN usa um modelo de condução de calor em diferenças finitas para a solução térmica do transiente e o modelo mecânico, FRACAS I, incorporado também no código FRAPCON.

Para considerar os efeitos da alta queima, o FRAPTRAN usa um modelo para a condutividade térmica do UO_2 que incorpora os efeitos da degradação com a queima e um modelo para as propriedades mecânicas do revestimento de Zircaloy que leva em conta os efeitos da oxidação e da formação de hidretos na vareta combustível, além dos danos sob irradiação.

As condições iniciais da vareta combustível dependentes da queima onde se inicia o transiente são obtidas da simulação da vareta combustível para esta queima determinada em regime permanente com o programa FRAPCON.

Os códigos FRAPTRAN e FRAPCON são acoplados ao MATPRO (*A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis*), que é o pacote das propriedades materiais utilizadas nos códigos.

O MATPRO é composto de sub-rotinas modulares que definem as propriedades materiais variáveis com a temperatura. Cada sub-rotina define uma única propriedade.

Por exemplo, o MATPRO contém sub-rotina definindo a condutividade térmica do combustível em função da temperatura, da densidade do combustível e da queima.

Descrição Geral do Código

Estrutura do Código e Rotina de Solução

O FRAPCON é um código grande e complexo que contém mais de 200 sub-rotinas.

Estrutura do Código

As sub-rotinas do FRAPCON foram agrupadas em pacotes, sendo que nem todos eles tem de ser compilados para cada rodada. Nota-se que para cada execução são necessários o pacote FRPCON e o pacote MATPRO. O primeiro contém as rotinas condutoras, as rotinas auxiliares e os modelos térmicos. Usando somente esses dois pacotes a execução fica restrita à utilização do modelo mecânico FRACAS-I.

Esquema de Solução

O FRAPCON começa com a inicialização do caso, seguido dos anéis de convergência e terminando com a saída.

Principais Pacotes do FRAPCON

Pacote	Descrição
<i>FRPCON</i>	A seção principal do código, incluindo todos os modelos térmicos; também inclui o modelo mecânico <i>FRACAS-I</i>
<i>FRACAS-I</i>	Contém as sub-rotinas do modelo mecânico <i>FRACAS-I</i>
<i>MATPRO</i>	O pacote das propriedades materiais <i>MATPRO</i>

Objetivos da Série FRAPCON

A habilidade de calcular com precisão o comportamento de varetas combustíveis de reatores à água leve pressurizada (LWR) sob condições de alta queima é o principal objetivo de programa de pesquisa conduzido pela *U.S. Nuclear Regulatory Commission* (NRC). Para atingir este objetivo, a NRC tem financiado uma extenso programa de desenvolvimento de um programa de computador analítico, assim como experimentos *in-pile* e *out-of-pile* para validar a capacidade do programa. O programa desenvolvido para calcular o comportamento em regime permanente a altas queimas de uma vareta combustível é o FRAPCON.

O FRAPCON é uma ferramenta analítica que calcula o comportamento sob irradiação de uma vareta combustível LWR, quando as variações de potência e as variações nas condições de contorno são suficientemente lentas para que o termo regime permanente seja aplicado. Isto inclui situações tais como longos períodos à potência constante e rampas lentas de potência que são típicas da operação normal de um reator nuclear.

O código FRAPCON calcula a variação no tempo de todas as variáveis significativas da vareta combustível, incluindo as temperaturas no combustível e no revestimento, as deformações e a oxidação no revestimento do combustível, a densificação, o inchamento, a liberação de gases de fissão e a pressão interna na vareta. Além disso, o código é projetado para gerar as condições iniciais para a análise de transientes da vareta combustível com o código FRAPTRAN.

O código FRAPCON está acoplado com o MATPRO que é o pacote das propriedades materiais utilizado no código. Ele é composto de sub-rotinas modulares que definem as propriedades materiais variáveis com a temperatura. Cada sub-rotina define uma única propriedade. Por exemplo, o MATPRO2 contém sub-rotinas definindo a condutividade térmica do combustível em função da temperatura, densidade do combustível e queima, a expansão térmica do combustível em função da temperatura do combustível e a relação tensão-deformação em função da temperatura do revestimento, taxa de deformação, encruamento, quantidade de hidretos e fluência de nêutrons rápidos.

Limitações do FRAPCON

O código tem limitações inerentes que são:

1. Os modelos térmicos são baseados em equações e condições de regime permanente e calculam somente o fluxo de calor radial. Similarmente, os modelos de liberação de gases são baseados em dados em regime permanente e rampas de potência lentas e não refletem as taxas de liberação para variações rápidas de potência. Então, variações na taxa de geração de calor linear não devem exceder 1,5 kW/ft (4,92 kW/m) entre intervalos de tempo e intervalos de tempo devem ser de 0,1 dia (2,4 h - 144 min), mas máximo de 50 dias. (Análise da resposta térmica pode envolver somente intervalos de tempo tão baixos como 0,001 dia – 1,44 min.) O código FRAPTRAN é recomendado para modelar transientes ou rampas de potência da ordem de uns poucos minutos ou menores
2. Somente pequenas deformações do revestimento ($< 5\%$ de deformação) têm significado. Todos os modelos térmicos e mecânicos assumem uma vareta combustível axissimétrica. O combustível é assumido não ter nenhuma restrição axial. Nenhuma validação foi desenvolvida para temperatura no revestimento > 700 K (427° C) ou para temperaturas no centro do combustível igual ou acima da temperatura de fusão
3. O programa não foi validado com dados para óxidos mistos e o modelo para calcular o perfil de potência radial não é capaz de modelar com precisão combustíveis de óxidos mistos. Uma validação muito limitada foi desenvolvida para varetas contendo gadolínio.

Esquema da Solução do FRAPCON

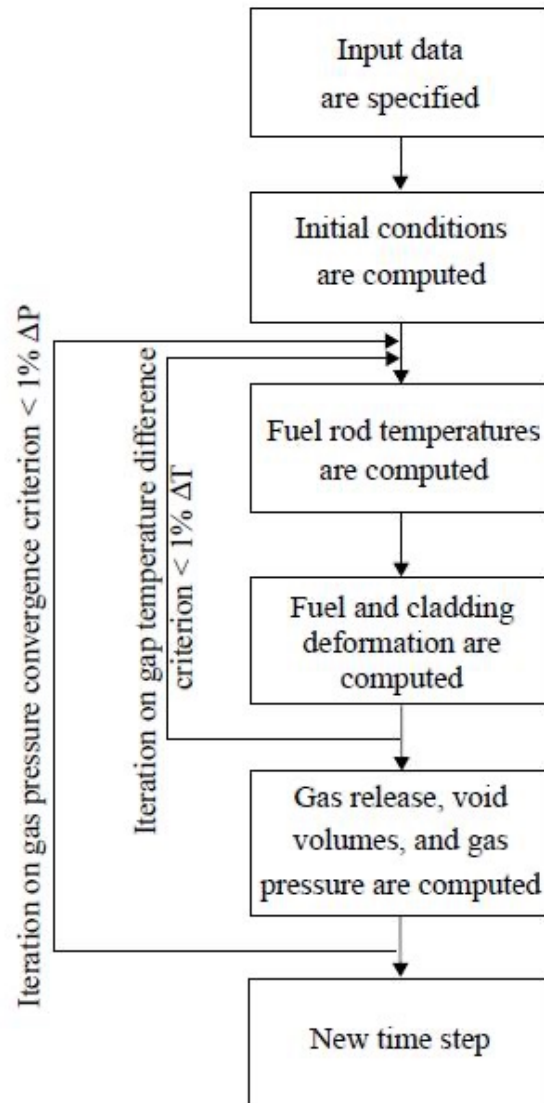
O código FRAPCON calcula os efeitos inter-relacionados das temperaturas no combustível e no revestimento, da pressão interna da vareta, das deformações do combustível e do revestimento, da liberação dos gases de fissão, do inchamento e da densificação do combustível, da expansão térmica e do crescimento induzido pela irradiação no revestimento, da corrosão do revestimento e da deposição do *crud* em função do tempo e da potência específica da vareta combustível.

O cálculo começa pelo processamento dos dados de entrada. Depois, o estado inicial da vareta combustível é determinado através de um cálculo da auto inicialização. O tempo é avançado de acordo com o tamanho do intervalo de tempo (*time step*) de entrada especificado. Uma solução em regime permanente é desenvolvida e um novo estado é determinado para a vareta combustível. O novo estado da vareta combustível fornece as condições iniciais para o próximo intervalo de tempo. Os cálculos são cíclicos para os intervalos de tempo especificados pelo usuário do código.

A solução para cada intervalo de tempo consiste em:

- 1) calcular as temperaturas no combustível e no revestimento
- 2) calcular as deformações do combustível e do revestimento
- 3) calcular a geração dos produtos de fissão e a sua liberação, volume de vazios e a pressão interna da vareta combustível.

Cada um desses cálculos é feito em uma sub-rotina separada. A resposta da vareta de combustível para cada intervalo de tempo é determinada pela repetição do ciclo de cálculos iterativos para cada bloco até que a temperatura da folga pastilha-revestimento e a pressão interna da vareta tenham convergido.



Fluxograma Simplificado do FRAPCON

Para o modelo mecânico FRACAS-I10, a temperatura e a deformação do combustível são calculadas de maneira alternada em um ciclo interno.

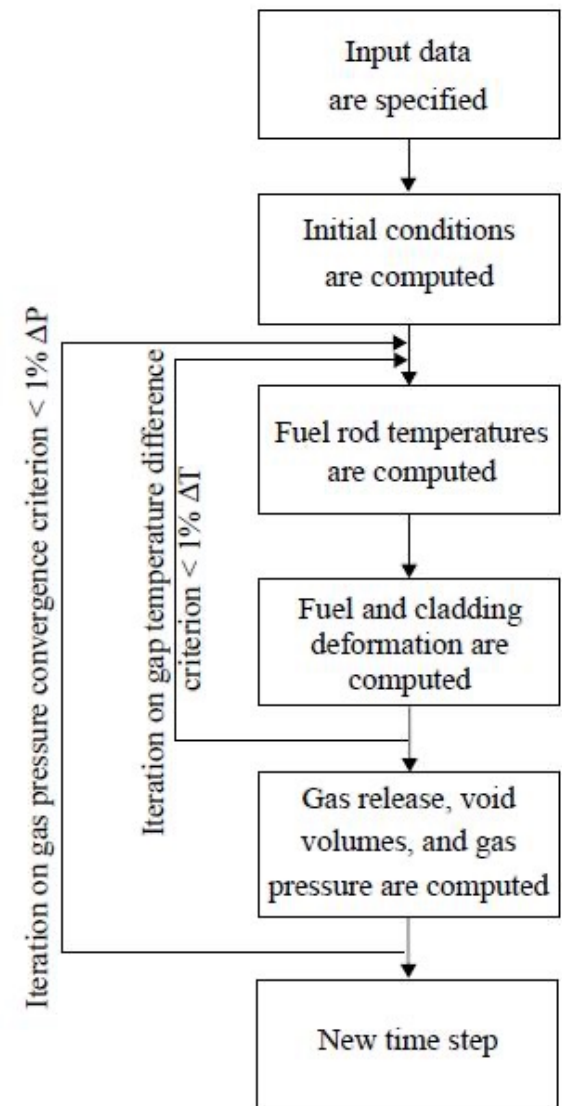
No primeiro ciclo através do circuito interno de cada intervalo de tempo, a condutância da folga é calculada usando o tamanho da folga do intervalo de tempo anterior.

Então, a distribuição de temperaturas é calculada.

A distribuição de temperatura alimenta o cálculo das deformações por influenciar as expansões térmicas do combustível e do revestimento e a relação tensão-deformação do revestimento.

Um novo tamanho da folga pastilha-revestimento (*gap*) é calculado e usado no cálculo da condutância da folga no próximo ciclo do circuito interno.

O processo cíclico através do circuito interno é repetido até que dois ciclos sucessivos calculem essencialmente a mesma distribuição de temperatura.



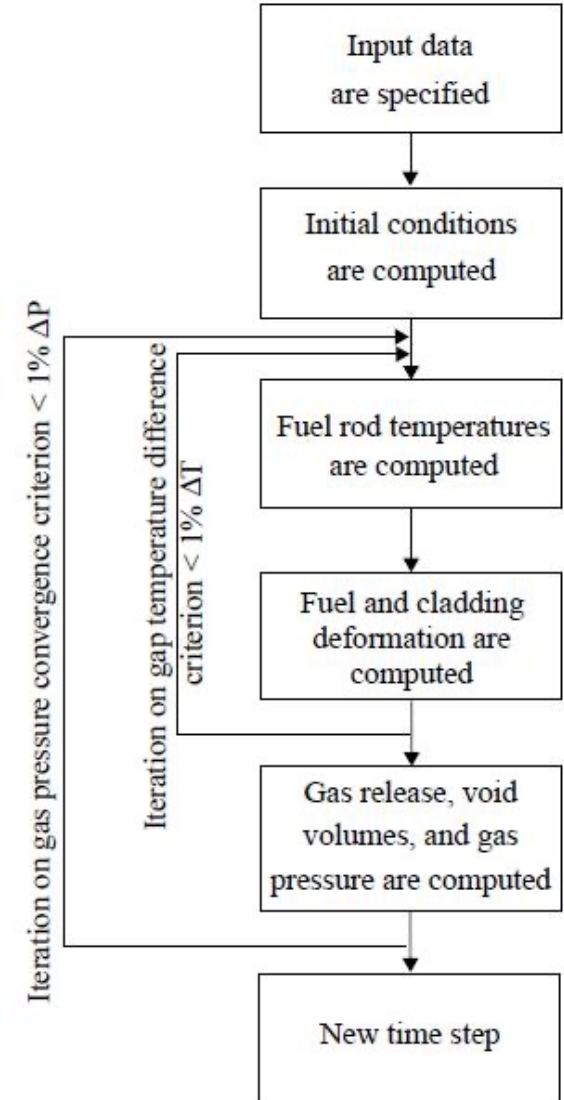
O circuito externo de cálculos percorre um ciclo da mesma maneira que o circuito interno, mas com a quantidade de gás interno sendo determinada a cada interação.

O cálculo alterna entre o cálculo do gás liberado, da pressão interna, e do volume de vazios na vareta de combustível.

No primeiro ciclo através do circuito externo para cada intervalo de tempo, a pressão do gás do intervalo de tempo anterior é usada.

Para cada ciclo através do circuito externo, o número de moles de gás é calculado e o novo valor da pressão do gás é calculado e realimenta os cálculos de deformação e temperatura (o circuito interno).

Os cálculos são cíclicos até que dois ciclos sucessivos calculem essencialmente a mesma pressão do gás e, então, um novo intervalo de tempo é iniciado.



Resposta Térmica da Vareta Combustível

A distribuição de temperaturas na pastilha e no revestimento é calculada para cada nó axial.

Os modelos usados nos cálculos das temperaturas na vareta de combustível assumem uma pastilha combustível cilíndrica localizada simetricamente dentro de uma vareta de combustível cilíndrica envolvida pelo refrigerante.

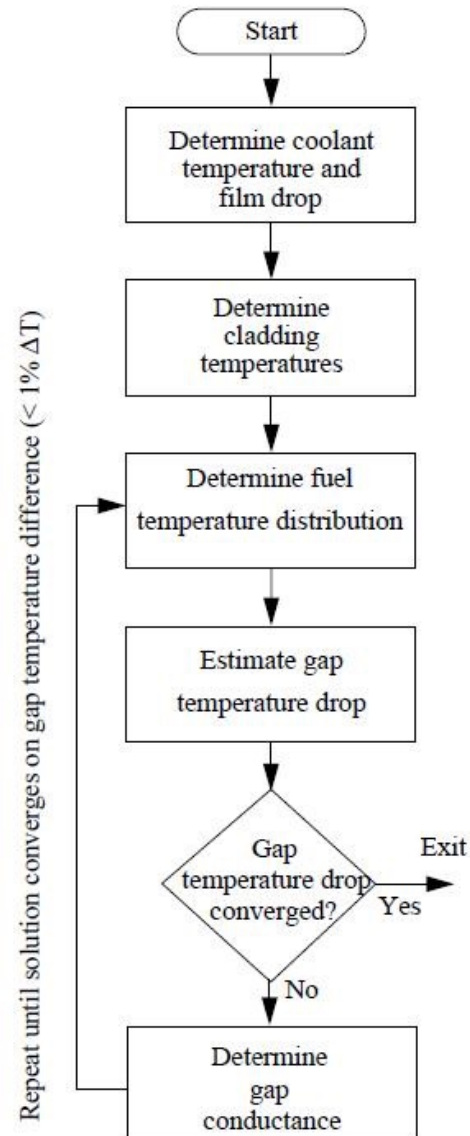
O usuário fornece as condições de contorno (temperatura de entrada do refrigerante, diâmetro equivalente do canal de refrigeração e a vazão do refrigerante) e a taxa de geração de calor linear axial que são usadas para calcular a temperatura do refrigerante, T_b , usando um modelo de aumento da entalpia do refrigerante no canal de refrigeração.

A queda da temperatura ΔT_f do refrigerante na superfície da vareta é calculada através de uma camada de [crud](#), que pode existir.

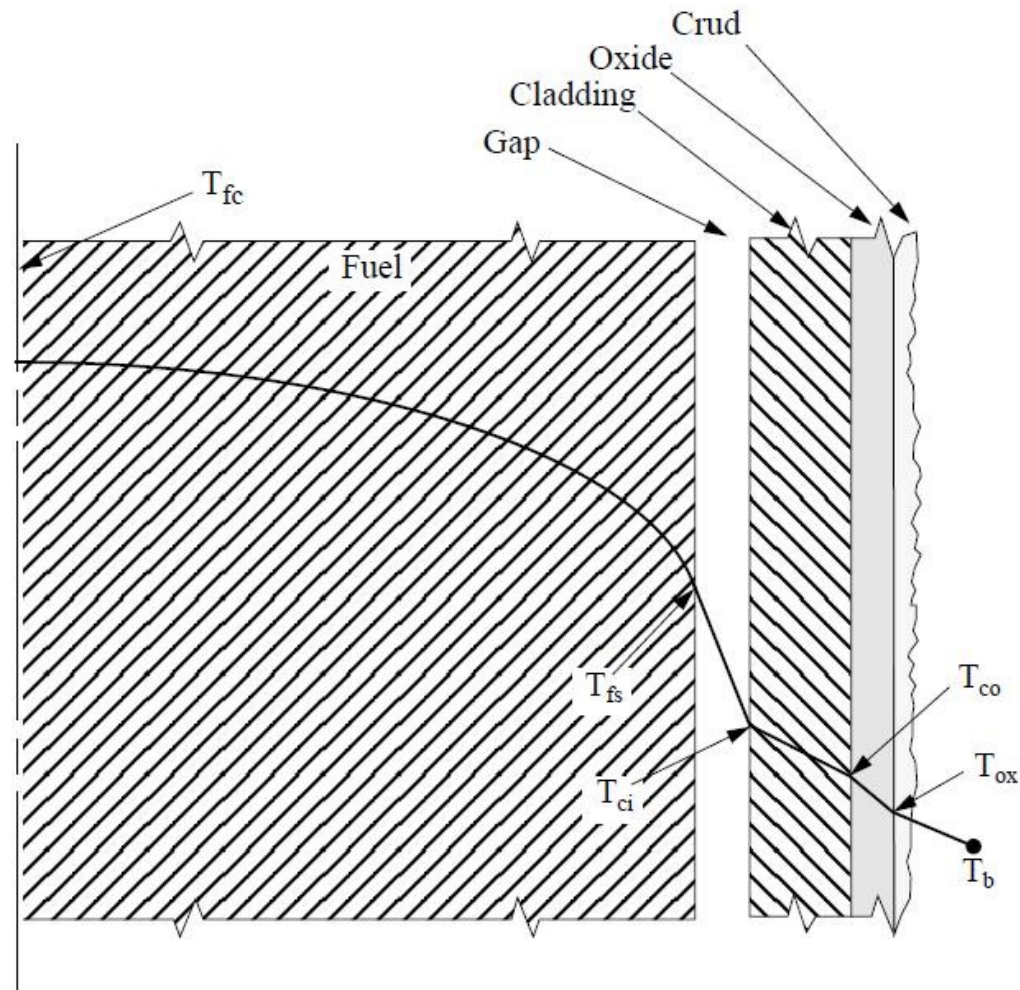
A temperatura interna do revestimento, T_{ci} , é calculada da queda de temperatura no óxido de zircônio e no revestimento usando a Lei de Fourier.

A temperatura na superfície do combustível é determinada pelo modelo da condutância da folga anular, que fornece a temperatura na superfície do combustível, T_{fs} .

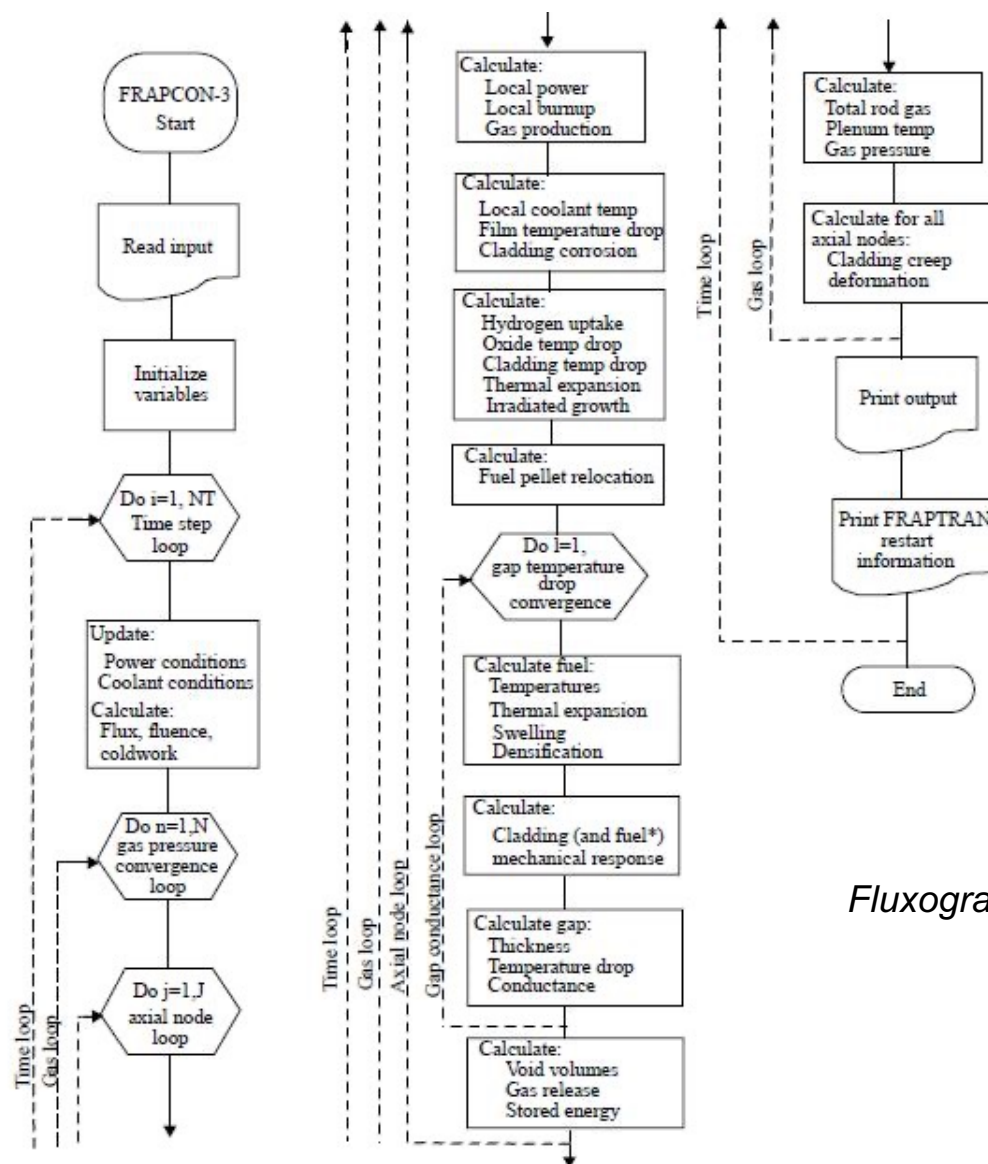
.



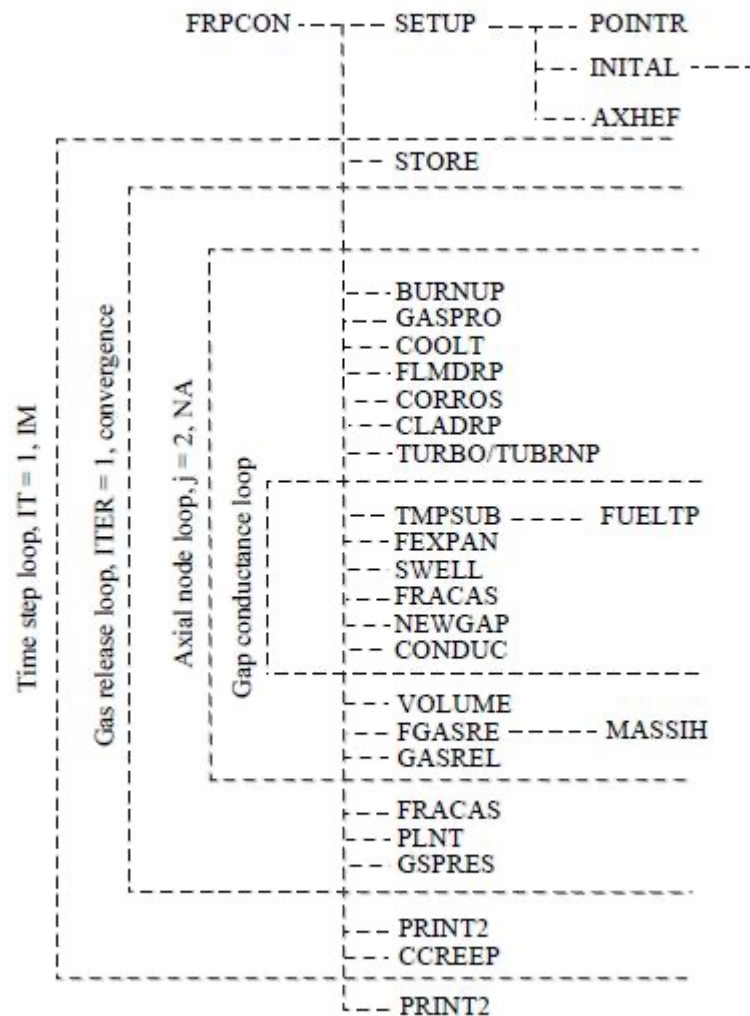
Fluxograma dos Cálculos das Temperaturas no Combustível e no Revestimento



Distribuição de Temperaturas na Vareta Combustível



Fluxograma do FRAPCON



Sequência de Chamada das Sub-Rotinas do FRAPCON

A primeira parte do fluxograma trata da inicialização do código.

Isso inclui a leitura dos dados de entrada, os procedimentos de dimensionamento dinâmico, a inicialização das variáveis e uma saída descritiva do problema inicial. As sub-rotinas listadas na Tabela 1.2 estão envolvidas na inicialização.

Em seguida, o código entra no primeiro dos quatro grandes anéis da codificação FORTRAN, o anel dos intervalos de tempo (*time-steps*).

O anel dos intervalos de tempo compreende virtualmente todo o resto do código FRAPCON.

Em cada execução do anel dos intervalos de tempo, o código resolve o equilíbrio termo-mecânico da vareta de combustível para cada novo ponto ao longo da entrada de potência da vareta em função do histórico de tempo fornecido pelo usuário.

Existem mais três anéis adicionais no código.

Sub-Rotinas de Inicialização

Sub-Rotinas	Descrição
<i>SETUP</i>	Lê os dados de entrada pertinentes aos requisitos de dimensionamento do problema
<i>POINTR</i>	Executa os procedimentos de dimensionamento dinâmico
<i>INITAL</i>	Lê a descrição dos dados de entrada remanescentes e inicializa as variáveis
<i>PRINT1</i>	Gera a saída, refletindo as condições iniciais e especificações da vareta de combustível e lista o histórico de potência proposto
<i>AXHEF</i>	Calcula o perfil de potência axial e como ele afeta as regiões axiais da vareta de combustível e também qualquer variação no perfil de potência axial

Exemplo de Dados de Entrada

Lines in Input File
Standard PWR test case
im = 7, ! number of power steps
! Identification of units for input
nunits = 1, ! input units are British units
! Definition of fuel rod environment
p2(1) = 2250.0, ! coolant pressure (psia)
tw(1) = 552.0, ! inlet temperature of water (F)
go(1) = 2500000.0, ! mass flow rate of coolant (lb/hr.ft ²)
pitch = 0.5629, ! pitch of fuel rods (in.)
! Definition of fuel rod cladding and plenum spring
dco = 0.422, ! outer cladding diameter (in.)
thkclad = 2.4e-2, ! radial thickness of cladding (in.)

Lines in Input File
icm = 4, ! cladding material indicator (zircaloy-4)
cldwks = 0.2, ! fractional cold work of the cladding
catexf = 0.05,
fgpav = 345.0, ! fill gas pressure (psia)
cpl = 6.8, ! plenum length (in.)
dspg = 0.35, ! coil diameter of spring in plenum (in.)
dspgw = 0.076, ! diameter of wire in plenum spring (in.)
vs = 28.0, ! total number of spring turns
roughc = 4.5e-5, ! arithmetic mean roughness of cladding surface (in.)
! Definition of fuel in fuel rod
thkgap = 3.75e-3, ! radial thickness of fuel cladding gap (in.)
totl = 12.0, ! height of fuel pellet stack (ft.)
den = 95.0, ! fuel density (%)
enrch = 2.8, ! fuel enrichment (weight %)
roughf = 8.5e-5, ! arithmetic mean roughness of fuel surface (in.)
dishsd = 0.043, ! pellet radius minus dish radius (in.)
hdish = 0.015, ! depth of dishes at ends of fuel pellets (in.)
hplt = 0.6, ! height of fuel pellets (in.)
deng = 0.75, ! percent of closed porosity volume
grnsiz = 5., ! initial size of fuel grains (microns)
tsing = 2911., ! sintering temperature of fuel pellets (F)
! Fuel rod power
! time(i) = time (days) to end of each level of power in array qmpy(i)
time = 0.1, .2, .3, .4, .5, 1, 3,
! qmpy(i) = fuel rod average linear heat rating (kW/ft) at time(i)
qmpy = 1, 2.5, 4, 5.5, 7, 7, 7,
jn(1) = 11, ! number of entries in axial power versus elevation table

Lines in Input File
! x(i) = elevations (ft.) for which axial power factors in array qf(i) apply
x(1) = 0.0, 1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6.0, 7.2, 8.4, 9.6, 10.8, 12.0,
! qf(i) = axial power factors for each elevation in array x(i)
qf(1) = .23, .64, .97, 1.21, 1.35, 1.40, 1.35, 1.21, .97, .64, .23,

Inicialização do Código FRAPCON

```

*****
*      frapcon3, steady-state fuel rod analysis code      *
*-----*
*
*      CASE DESCRIPTION:
*
*UNIT   FILE DESCRIPTION
*-----*
*      Output :
*      6      STANDARD PRINTER OUTPUT
*
*      Scratch:
*      5      SCRATCH INPUT FILE FROM ECH01
*
*      Input:   FRAPCON2 INPUT FILE (UNIT 55)
*
*****
* GOESINS:
FILE05='nullfile', STATUS='UNKNOWN', FORM='FORMATTED',
      CARRIAGE CONTROL='NONE'
*
* GOESOUTS:
FILE06='AISI.out',   STATUS='UNKNOWN', CARRIAGE CONTROL='LIST'
FILE66='AISI.plot',  STATUS='UNKNOWN', FORM='FORMATTED',
      CARRIAGE CONTROL='LIST'
/*****
Base Irradiation
$frpcn
im=11, na=11,
mechan = 2, ngasr = 11,
$end
$frpcon
dco=0.0098, thkcld=0.0006, thkgap=5.5e-5, totl=0.9870, cpl=0.082,
dspg=0.0085, dspgw=1.25e-3, vs=45,
hplt=0.0105, rc=0.0, hdish=1.3e-4, dishsd=1.0e-3,
enrch=4.3, fotmtl=2.0,
den=94.0, roughf=2.0e-6, rsnt=0,
icm=4, cldwks=0.0, roughc=7.0e-7,
idxgas=1, fgpav=2.76e6,
iplant=-2, nsp=0, p2=13.8e6, tw=537, go=748.3, pitch=0.0129,
nunits=0, crephr=10.0, jdlpr=0, nplot=1, ntape=1,
jst=11*1, iq=0, fa=1, jn(1)=25,
x(1)=0.0,0.0411,0.0823,0.1234,0.1645,0.2056,0.2468,0.2879,0.3290,
      0.3701,0.4113,0.4524,0.4935,0.5346,0.5758,0.6169,0.6580,
      0.6991,0.7403,0.7814,0.8225,0.8636,0.9048,0.9459,0.9870,
qf(1)=1.78,2.15,2.56,2.88,3.05,3.06,2.91,2.53,1.44,1.16,1.00,0.86,
      0.74,0.65,0.56,0.48,0.42,0.36,0.30,0.24,0.21,0.16,0.12,0.09,0.06,
ProblemTime= 0.1,10,50,90,130,170,210,250,290,330,365,
qmpy= 0.1,10*8.94,
$end

```

Inicialização do Código FRAPCON vareta de combustível

```

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
X                      **** FRAPCON-3.4 (May 04 09) ****                      X
X                      Released August 2005                                   X
X                                                                                   X
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

```

```

cladding material is zircaloy-4
cladding outside diameter,      cm(in.)      9.80E-01(3.86E-01)
cladding inside diameter,      cm(in.)      8.60E-01(3.39E-01)
cladding thickness,            mm(in.)      6.00E-01(2.36E-02)
clad arithmetic mean roughness, mm(mils)    7.00E-04(2.76E-02)
diametral gap thickness,       mm(mils)    1.10E-01(4.33E+00)
fuel pellet diameter,         cm(in.)      8.49E-01(3.34E-01)
fuel pellet length,           cm(in.)      1.05E+00(4.13E-01)
fuel pellet dish depth,       mm(in.)      1.30E-01(5.12E-03)
fuel pellet dish shoulder width, mm(in.)    1.00E+00(3.94E-02)
fuel pellet dish sperical radius, cm(in.)    4.06E+00(1.60E+00)
fuel pellet core radius,      mm(in.)      0.00E+00(0.00E+00)
fuel pellet sintering temperature, K(F)    1.87E+03(2.91E+03)
fuel pellet true density,      percent      9.40E+01
*caution, densification calculated without input of densification information
fuel volume,                   cu.m(cu.in.) 5.55E-05(3.39E+00)
fuel arithmetic mean roughness, mm(mils)    2.00E-03(7.87E-02)
fuel stack height,            m(ft.)      9.87E-01(3.24E+00)
fuel dish volume fraction,     7.24E-03
Fuel is UO2
U-235 enrichment,             at% in U      4.30E+00
fuel fission atoms(xe + kr)/100 fissions, 3.10E+01
fuel water concentration,      ppm         0.00E+00
fuel nitrogen concentration,    ppm         0.00E+00
plenum length,                 cm(in.)    8.20E+00(3.23E+00)
plenum spring diameter,        cm(in.)    8.50E-01(3.35E-01)
plenum spring wire diameter,   mm(in.)    1.25E+00(4.92E-02)
plenum spring volume,          cu.m(cu.in.) 1.26E-06(7.68E-02)
plenum volume,                 cu.m(cu.in.) 3.51E-06(2.14E-01)
plenum spring turns,           4.50E+01
rod total void volume,          cu.m(cu.in.) 5.57E-06(3.40E-01)
rod internal helium pressure, mpa(psia)    2.76E+00(4.00E+02)
fuel rod pitch,                cm(in.)    1.29E+00(5.08E-01)
channel equivalent diameter,    cm(in.)    1.18E+00(4.65E-01)

```

Inicialização do Código FRAPCON. Histórico de Potência, Pressão do Refrigerante, Temperatura do Refrigerante, vazão mássica

```

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
x                      **** FRAPCON-3.4 (May 04 09) ****                      x
x                      Released August 2005                      x
x                                                                x
x                                                                x
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

```

Power-time step	(hrs)	Time (days)	Rod Ave. (kw/m)	Power (kw/ft)	Coolant (mpa)	Pressure (psia)	coolant inlet temp. (K)	(F)	Coolant Mass Flux (kg/s-m**2)	(lbm/hr-ft2)
1	2.4	0.10	0.10	0.03	13.80	2001.6	537.0	506.9	748.3	551750.0
2	240.0	10.00	8.94	2.72	13.80	2001.6	537.0	506.9	748.3	551750.0
3	1200.0	50.00	8.94	2.72	13.80	2001.6	537.0	506.9	748.3	551750.0
4	2160.0	90.00	8.94	2.72	13.80	2001.6	537.0	506.9	748.3	551750.0
5	3120.0	130.00	8.94	2.72	13.80	2001.6	537.0	506.9	748.3	551750.0
6	4080.0	170.00	8.94	2.72	13.80	2001.6	537.0	506.9	748.3	551750.0
7	5040.0	210.00	8.94	2.72	13.80	2001.6	537.0	506.9	748.3	551750.0
8	6000.0	250.00	8.94	2.72	13.80	2001.6	537.0	506.9	748.3	551750.0
9	6960.0	290.00	8.94	2.72	13.80	2001.6	537.0	506.9	748.3	551750.0
10	7920.0	330.00	8.94	2.72	13.80	2001.6	537.0	506.9	748.3	551750.0
11	8760.0	365.00	8.94	2.72	13.80	2001.6	537.0	506.9	748.3	551750.0

the stored energy is normalized to 77.00 degrees F

Inicialização do Código FRAPCON Distribuição Axial de Potência

```

xxxxxxxxxxxxxxxx axial power shape information xxxxxxxxxxxxxxxxxxx
axial distribution is input      rod average power is input      number of axial nodes= 11
                                x's in meters
xxxxxxxxxxxxxxxx input axial shape number 1 xxxxxxxxxxxxxxxxxxx peak node is 3
x( 1)= 0.0000  x( 2)= 0.0411  x( 3)= 0.0823  x( 4)= 0.1234  x( 5)= 0.1645  x( 6)= 0.2056  x( 7)= 0.2468
x( 8)= 0.2879  x( 9)= 0.3290  x(10)= 0.3701  x(11)= 0.4113  x(12)= 0.4524  x(13)= 0.4935  x(14)= 0.5346
x(15)= 0.5758  x(16)= 0.6169  x(17)= 0.6580  x(18)= 0.6991  x(19)= 0.7403  x(20)= 0.7814  x(21)= 0.8225
x(22)= 0.8636  x(23)= 0.9048  x(24)= 0.9459  x(25)= 0.9870  x(26)= 1.0281  x(27)= 1.0692  x(28)= 1.1103
qf( 1)= 1.7800  qf( 2)= 2.1500  qf( 3)= 2.5600  qf( 4)= 2.8800  qf( 5)= 3.0500  qf( 6)= 3.0600  qf( 7)= 2.9100
qf( 8)= 2.5300  qf( 9)= 1.4400  qf(10)= 1.1600  qf(11)= 1.0000  qf(12)= 0.8600  qf(13)= 0.7400  qf(14)= 0.6500
qf(15)= 0.5600  qf(16)= 0.4800  qf(17)= 0.4200  qf(18)= 0.3600  qf(19)= 0.3000  qf(20)= 0.2400  qf(21)= 0.2100
qf(22)= 0.1600  qf(23)= 0.1200  qf(24)= 0.0900  qf(25)= 0.0600  qf(26)= 0.0300  qf(27)= 0.0100  qf(28)= 0.0000

increment      axial station      normalized
      feet      meters      heat flux
      1st      2nd      3rd      4th      5th      6th      7th      8th
1      0.1472      0.04486      1.8266
2      0.4416      0.13459      2.4111
3      0.7360      0.22432      2.4635
4      1.0303      0.31405      1.5815
5      1.3247      0.40377      0.8610
6      1.6191      0.49350      0.6224
7      1.9135      0.58323      0.4556
8      2.2079      0.67295      0.3312
9      2.5022      0.76268      0.2247
10     2.7966      0.85241      0.1452
11     3.0910      0.94214      0.0772

      avgqi = 1.0000

normalized heat flux at top of stack = 0.3000

xxxxxxxxxxxx initial plenum gases (moles) xxxxxxxxxxxxxxx
air = 0.00000E+00  nitrogen = 0.00000E+00  argon = 0.00000E+00  fission gas = 0.00000E+00  helium = 0.62643E-02

```

Sub-Rotinas no Anel Intervalo de Tempo

Sub-Rotinas	Descrição
<i>STORE</i>	Armazena valores de variáveis quando necessário levando em consideração a dependência com o histórico de potência.
<i>PRINT2</i>	Gera a saída para o código que apresenta os valores convergidos dos nós axiais para as soluções térmicas e mecânicas.
<i>CCREEP</i>	A porção da fluência do revestimento do modelo mecânico <i>FRACAS-I</i> (a sub-rotina chama FCMI, que por sua vez chama CLADF que chama CREPR onde o modelo da taxa de fluência está localizado).

O próximo anel encontrado dentro do anel do intervalo de tempo é o anel da liberação de gases.

Esse anel é realimentado até que o valor calculado para a pressão interna dos gases na vareta (dependente da temperatura, volume e liberação dos gases) converge.

O próximo anel interno no código é o anel dos nós axiais. Para cada passagem através do anel de liberação de gases, o anel dos nós axiais passa através de cada região axial definida na entrada de dados.

O anel mais interno é o anel da condutância da folga. Esse anel interage em cada nó axial até que o equilíbrio térmico na direção radial é encontrado.

O equilíbrio térmico é sinalizado por um valor que converge para a queda de temperatura da superfície externa do combustível para a superfície interna do revestimento.

Na finalização de todos os intervalos de tempo e antes de retornar para o pacote condutor, uma chamada final é feita para PRINT2. Essa chamada resulta na impressão de uma tabela resumo para o histórico de potência global da vareta.

Sub-Rotinas no Anel de Liberação de Gases

Sub-Rotinas	Descrição
FRACAS	O modelo de resposta mecânica combustível-revestimento é controlado por esta sub-rotina. Esse anel calcula a deformação permanente independente do tempo.
PLNT	Calcula o volume e temperatura do gases no <i>plenum</i>
GSPRES	Calcula a pressão interna do gases na vareta de combustível.

Apresentação das Sub-Rotinas no Anel de Nós Axiais

Sub-Rotinas	Descrição
BURNUP	Calcula a queima do combustível local.
GASPRO	Calcula a produção de gases de fissão
COOLT	Calcula a temperatura do refrigerante.
FLMDRP	Calcula a queda de temperatura da superfície do revestimento para o refrigerante.
CORROS	Calcula a corrosão da superfície do revestimento.
CLADRP	Calcula a queda de temperatura da parte interna do revestimento para a parte externa do revestimento.
TUBRNP	Calcula a potência radial e a distribuição da queima.

Sub-Rotinas no Anel da Condutância da Folga

Sub-Rotinas	Descrição
TMPSUB	Calcula a distribuição de temperatura radial através do combustível.
FUELTP	Resolve as equações para o balanço de calor radial.
FEXPAN	Rotina de expansão térmica do combustível.
SWELL.	Calcula o inchamento do combustível e a densificação do combustível.
FRACAS	Essa sub-rotina calcula um nova posição do revestimento devido a deflexão causada pela variação da pressão interna.
NEWGAP	Calcula o novo tamanho da folga pastilha-revestimento (usada com o modelo mecânico FRACAS).
CONDOC	Calcula os novos valores para a condutância da folga e a folga combustível-revestimento

Resultados do Programa

O FRAPCON gera uma resposta para a vareta de combustível que é uma função das informações de fabricação, condições de contorno e histórico de potência.

Essa resposta é fornecida ao usuário na forma impressa e na forma gráfica.

Existe também a capacidade de se fornecer as informações em regime permanente para inicialização do código FRAPTRAN.

As informações fornecidas para a análise transiente da vareta de combustível consiste dos efeitos que são permanentes ao longo da queima, tais como fluência do revestimento, inchamento do combustível, densificação do combustível, potência radial normalizada e perfis de queima e inventário de produtos de fissão.

Variáveis que variam lentamente com o tempo tal como densificação, inchamento, fluência do revestimento, crescimento axial sob irradiação e liberação de gases não são calculadas pelo FRAPTRAN e são lidas do FRAPCON.

FRAPTRAN, então, não inclui modelos para calcular liberação de gases em regime transiente e o inchamento do combustível.

Usuário pode especificar liberação de gases em regime transiente e histórico de inchamento do combustível.

FRAPTRAN tem modelo de condução de calor em diferenças finitas.

Novo modelo de condutividade térmica do UO_2 que leva em conta a degradação com a queima.

Modelos para o Zircaloy que leva em conta efeitos da oxidação e hidretação além dos danos da irradiação.

FRAPTRAN calcula as temperaturas no combustível e no revestimento, deformações e tensões elásticas e plásticas, pressão na vareta em função da potência, tempo e condições do refrigerante.

Resposta da Vareta de Combustível

O FRAPCON fornece resultados calculados para a resposta térmica, mecânica e de pressão interna da vareta de combustível. Os resultados são apresentados de três formas: uma impressão de cada região axial, uma impressão do histórico de potência e uma impressão de uma página resumo.

A impressão da região axial apresenta a potência local, tempo, intervalo de tempo e queima. Também apresenta a distribuição radial de temperaturas na vareta, a temperatura do refrigerante, tensões e deformações no revestimento (tantos as recuperáveis quanto as permanentes), a condutância da folga, a pressão interfacial pastilha-revestimento e as informações sobre a transferência de calor do refrigerante.

A saída para a potência-intervalo de tempo apresenta a queima da vareta de combustível, o volume de vazios e as temperaturas associadas, a fração em moles dos gases constituintes e frações liberadas, a quantidade total dos moles de gases na vareta e a pressão dos gases na vareta. Também, essa impressão apresenta as tensões, deformações, temperaturas e energia armazenada em função da região axial.

A página de resumo apresenta as informações da região axial mais quente. Essa inclui temperaturas do revestimento, da folga pastilha-revestimento e do combustível, pressão interfacial combustível-revestimento, tensões e deformações do revestimento, diâmetro externo do combustível, condutância da folga e pressão dos gases, espessura da camada de óxido para o zircaloy e captura de hidrogênio.

Inicialização do FRAPTRAN

O FRAPCON contém a sub-rotina RESTFS, que quando o flag NTAPE is colocado em 1, ela armazena o conjunto de informações dependente do histórico de potência para cada intervalo de tempo-potência. Essa informação é armazenada na unidade TAPE1 e é para a inicialização do FRAPTRAN. Isso fornece ao usuário a habilidade de modelar a resposta da vareta de combustível que experimenta uma queima significativa antes que algum transiente seja iniciado.

Resultados do Código FRAPCON

```

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
X                      **** FRAPCON-3.4 (May 04 09) ****                      X
X                                                                                   X
X                                                                                   X
X                                                                                   X
X                                                                                   X
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

```

***** Peak power axial node output *****

	time	peak	burnup	power	clad	temp	(K)	gap	fuel	temp	(K)	cont.	clad	stress	strain	fuel	od	gap	con	press	fgas	zro2	H2
xxx	days	node	MWd/kgU	kw/m	od.	avg	id.	microns	od.	avg	cent	MPa	hoop	axial	pct	mm		w/m2-K	MPa	rel%	microns		ppm
xxx	xxxxxx	xx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx
1	0.1	3	0.00	0.25	538.	538.	538.	40.9	540.	542.	543.	0.00	-76.5	-43.1	0.3327	8.5459		5538.	5.051	0.0	0.0		10.0
2	10.0	3	0.43	22.03	611.	623.	636.	49.4	781.	1020.	1290.	0.00	-73.2	-41.6	0.4806	8.5420		5589.	5.514	0.0	0.0		10.0
3	50.0	3	2.15	22.03	611.	623.	636.	54.2	793.	1038.	1313.	0.00	-74.5	-42.2	0.4710	8.5320		5145.	5.328	0.0	0.0		10.0
4	90.0	3	3.88	22.03	611.	623.	636.	51.8	787.	1034.	1311.	0.00	-74.8	-42.3	0.4655	8.5364		5376.	5.287	0.0	0.0		10.0
5	130.0	3	5.61	22.03	611.	623.	636.	50.0	782.	1033.	1313.	0.00	-74.9	-42.4	0.4610	8.5395		5551.	5.269	0.0	0.0		10.0
6	170.0	3	7.33	22.03	611.	623.	636.	48.3	777.	1033.	1315.	0.00	-74.9	-42.4	0.4571	8.5425		5732.	5.268	0.0	0.0		10.0
7	210.0	3	9.06	22.03	611.	623.	636.	46.5	772.	1032.	1318.	0.00	-74.9	-42.4	0.4534	8.5456		5932.	5.269	0.0	0.0		10.0
8	250.0	3	10.78	22.03	611.	623.	636.	44.8	768.	1032.	1321.	0.00	-74.9	-42.3	0.4499	8.5487		6140.	5.280	0.1	0.0		10.0
9	290.0	3	12.51	22.03	611.	623.	636.	43.1	763.	1032.	1323.	0.00	-74.8	-42.3	0.4464	8.5517		6364.	5.293	0.1	0.0		10.0
10	330.0	3	14.24	22.03	611.	623.	636.	41.3	759.	1032.	1326.	0.00	-74.7	-42.2	0.4430	8.5548		6606.	5.308	0.1	0.0		10.0
11	365.0	3	15.75	22.03	611.	623.	636.	39.8	754.	1031.	1329.	0.00	-74.6	-42.2	0.4400	8.5575		6837.	5.323	0.1	0.0		10.0

```

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
X                      **** FRAPCON-3.4 (May 04 09) ****                      X
X                      Released August 2005                                  X
X                                                                                   X
X                                                                                   X
X                                                                                   X
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

```

end of life strain range (percent) = 0.0011

fission gas cumulative fraction release = 0.000785

zro2 weight gain ,(gm/m**2) = 0.00

Resultados do Código FRAPCON - Licenciamento

```

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
X          **** FRAPCON-3.4 (May 04 09) ****          X
X          Released August 2005                      X
X                                                    X
X                                                    X
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

```

end of life strain range (percent) = 0.0011

fission gas cumulative fraction release = 0.000785

zro2 weight gain ,(gm/m**2) = 0.00

```

REGULATORY OUTPUT SUMMARY
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
X          Rod Internal Pressure          X
X                                                    X
X Initial Cold Fuel Rod Plenum Volume = 0.33966 in^3 X
X                                                    X
X Maximum Fuel Rod Internal Pressure = 799.79 psi X
X Peak nodal burnup = 0.43 Gwd/MTU X
X Rod average burnup = 0.17 Gwd/MTU X
X Fuel rod void volume = 0.34386 in^3 X
X Fission gas release = 0.00 % X
X Time = 10.000 days X
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
X          Centerline Temperature        X
X                                                    X
X Maximum Fuel Centerline Temperature = 1931.68 deg.F X
X Axial node = 3 X
X Nodal burnup = 15.75 Gwd/MTU X
X Rod average burnup = 6.39 Gwd/MTU X
X Time = 365.000 days X
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
X          Strain Increment              X
X                                                    X
X Maximum Strain Increment(elas+plas) = 0.147898 % X
X Axial node = 3 X
X Nodal burnup = 0.43 Gwd/MTU X
X Rod average burnup = 0.17 Gwd/MTU X
X Time = 10.000 days X
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

```

Table A-1. Control Integers in \$FRPCN

Variable name	Description	Limitations
IM	Number of time steps	Greater than 1, less than 400
NR	Number of radial boundaries in the pellet (for temperature calculations and temperature distribution output). These are spaced by the code with the greater fraction in the outer region to optimize definition of the heat generation radial distribution.	Greater than 1, less than 30; suggested number is 17
NGASR	Number of equal-volume radial rings in the pellet for gas release calculations. Also signals which gas release model the code will use. If NGASR is 10 or less, the ANS5.4 model is used; if 11 or greater, the MASSIH subroutine is used.	Greater than 1, less than 50; suggested number is 20
NA	Number of equal-length axial regions along the rod, for which calculations are performed and output.	Greater than 1, less than 20 less than 18
NTAPE	Write output to a file for FRAPTRAN restart. ntape ≤ 0 do not write ntape > 0 write output to file named restart	Default = 0

Table A-2. Case Descriptor Variables in \$FRPCON

Variable name and type I = integer R = real	Variable description	Units: British/SI	Limitations and default values
AMFAIR (R)	Mole fraction of air; use only if IDXGAS = 6.		Default = 0.0
AMFARG (R)	Mole fraction of argon; use only if IDXGAS = 6.		Default = 0.0
AMFFG (R)	Mole fraction of fission gas; use only if IDXGAS = 6 and if AMFXE and AMFKRY = 0.0.		Default = 0.0
AMFHE (R)	Mole fraction of helium; use only if IDXGAS = 6.		Default = 0.0 (note default on IDXGAS = 1 initializes pure He)
AMFH2 (R)	Mole fraction of hydrogen; use only if IDXGAS = 6.		Default = 0.00
AMFH2O (R)	Mole fraction of water vapor; use only if IDXGAS = 6.		Default = 0.0
AMFKRY (R)	Mole fraction of krypton; use only if IDXGAS = 6.		Default = 0.0
AMFN2 (R)	Mole fraction of nitrogen; use only if IDXGAS = 6.		Default = 0.0
AMFXE (R)	Mole fraction of xenon; use only if IDXGAS = 6.		Default = 0.0
CREPHR (R)	Creep time step size.	hours/hours	Default = 100.0
CATEXF (R)	Cladding texture factor, defined as the fraction of cladding cells with basal poles parallel to the longitudinal axis of the cladding tube.	Dimensionless	Default = 0.05
CLDWKS (R)	Cold-work of the cladding (fractional reduction in cross-section area due to processing).	Dimensionless	Default = 0.2

Table A-2. Case Descriptor Variables in \$FRPCON (Continued)

Variable name and type I = integer R = real	Variable description	Units: British/SI	Limitations and default values
COMP (R)	Weight fraction of plutonia in urania	Weight fraction	Default = 0.0
CPL (R)	Cold plenum length	inches/meters	
CRDT (R)	Initial thickness of crud layer on cladding outside surface	mils/meters	Default = 0.0
CRDTR (R)	Rate of crud accumulation (used if ICOR = 2)	mils/s meters/s	Default = 0.0
DCO (R)	Cladding outer diameter	Inches/meters	
DEN (R)	As-fabricated apparent fuel density	Fraction of theoretical density	Theoretical density taken as 10.97 g/cc
DENG (R)	Open porosity fraction for pellets	Fraction of theoretical density	Default = 0.0
DISHSD (R)	Pellet end-dish shoulder width (outer radius of fuel pellet minus radius of dish)	Inches/meters	
DSPG (R)	Outer diameter of plenum spring	Inches/meters	
DSPGW (R)	Diameter of the plenum spring wire	Inches/meters	
ENRCH (R)	Fuel pellet ^{235}U enrichment	Atom % ^{235}U in total U	
FA (R)	Peak-to-average power ratio for cosine-type axial power distribution (= 1.0, unless IQ = 1; see description of IQ)	Dimensionless	
FGPAV (R)	Initial fill gas pressure (taken to be at room temperature)	psia/Pa	
FLUX(J) (R)	Conversion between fuel specific power and fast neutron flux ($E > 1 \text{ MeV}$). Input a value for each axial node.	$\text{n}^2/\text{m}^2/\text{s}/\text{W/g}$ of fuel	Default = $0.25 \text{ H}10^{17}$
FOTMTL (R)	Oxygen-to-metal atomic ratio in the oxide fuel pellet	Dimensionless	Default = 2.0

Table A-2. Case Descriptor Variables in \$FRPCON (Continued)

Variable name and type I = integer R = real	Variable description	Units: British/SI	Limitations and default values
GADOLN (R)	Weight fraction of gadolinia in urania-gadolinia fuel pellets	Dimensionless	Default = 0.0
GO(IT) (R)	Mass flux of coolant around fuel rod. Input a value for each time step if NSP = 1.	lb/hr-ft ² kg/s-m ²	Default = 0.0
HDISH (R)	Height (depth) of pellet dish, assumed to be a spherical indentation.	Inches/meters	
HPLT (R)	Height (length) of each pellet	Inches/meters	
ICM (I)	Cladding type indicator: 2 = zircaloy 2 4 = zircaloy 4	Dimensionless	
ICOR (I)	Index for crud model: 0, 1 = constant crud; 1 mil crud layer assumed; 20 °F maximum temperature rise across this layer. 2 = variable crud; growth rate is CRDTR, starting from zero crud layer; 0.5 Btu/hr/ft-F is conductivity of layer. To eliminate crud effect, use ICOR = 2 but give CRDTR a very small value.	Dimensionless	
IDXGAS (I)	Initial fill gas type indicator: 1 = helium 2 = air 3 = nitrogen 4 = fission gas 5 = argon 6 = user-specified mix using the AMFXX variables AMFAIR, etc.	Dimensionless	Default = 1
IMSWCH (I)	Signal for EM models: = 0 No EM models = 1 Selected EM models, input signals in \$EMFPCN	Dimensionless	

Table A-2. Case Descriptor Variables in \$FRPCON (Continued)

Variable name and type I = integer R = real	Variable description	Units: British/SI	Limitations and default values
IPLANT (I)	Signal for which type of reactor: -2 = PWR -3 = BWR -4 = HBWR	Dimensionless	
IQ (I)	Indicator for axial power shape; 0 = User-input power shapes with QMPY = rod-average powers and power shapes defined by QF, X, and FA = 1.0 1 = Chopped cosine shape, with FA = peak-to-average ratio and QMPY = peak power.	Dimensionless	
JDLPR (I)	Output print control: 0 = all axial nodes 1 = peak-power axial node	Dimensionless	
JN (I)	The number of QF, X value pairs for each axial power shape; required input if IQ = 0. Input i the same sequence as the QF and X arrays.	Dimensionless	Maximum number of shapes is 20
JST (I)	The sequential number of the power shape to be used for each time step. One value of JST is required per time step if IQ = 0.	Dimensionless	Maximum number of power shapes = 20. Maximum time steps is 400.
NSP (I)	Signal for time-dependent input arrays for P2, TW, and GO: If NSP = 0, single values for these three variables will be used for all time steps. If NSP = 1, a value for each variable for each time step must be input.	Dimensionless	
NUNITS (I)	Signal for units system to be used for input and output: 1 = British units 0 = SI units Some errors may occur if NUNITS = 1.	Dimensionless	Default = 11

Table A-2. Case Descriptor Variables in \$FRPCON (Continued)

Variable name and type I = integer R = real	Variable description	Units: British/SI	Limitations and default values
P2 (R)	Coolant system pressure. Must be input for each time step if NSP = 1.	psia/Pa	
PITCH (R)	Center-to-center distance between rods in a square array	Inches/meters	
PPMH2O (R)	Parts per million by weight of moisture in the as-fabricated pellets	ppm	Default = 0.0
PPMN2 (R)	Parts per million by weight of nitrogen in the as-fabricated pellets	ppm	Default = 0.0
QEND (R)	Fraction of end-node heat that transfers to the plenum gas	Dimensionless	Default = 0.3
QF(N) (R)	The ratio of the linear power at the X(N) elevation to the axially-averaged value for the M-th power shape. The number of QF, X pairs for the Mth power shape is defined by JN(M). The user must define the QF values such that the axially-averaged value of each power shape is 1.0.	Dimensionless	
QMPY(IT) (R)	The linear heat generation rate at each time step. This equals the rod-average value if IQ = 0 and the peak value if IQ = 1.	kW/ft / kW/m	Limit 400 steps
RC (R)	The inner pellet radius	Inches/meters	
ROUGHG (R)	The cladding surface arithmetic mean roughness, peak-to-average	Inches/meters	
ROUGHF (R)	The fuel pellet surface arithmetic mean roughness, peak-to-average	Inches/meters	
RSNTR (R)	The increase in pellet density expected during in-reactor operation (determined from a standard re-sintering test)	kg/m ³	
SGAPF (R)	Number of fission gas atoms formed per 100 fissions	Dimensionless	Default = 31.0

Table A-2. Case Descriptor Variables in \$FRPCON (Continued)

Variable name and type I = integer R = real	Variable description	Units: British/SI	Limitations and default values
SLIM (R)	Limit on swelling	Volume %	
THKCLD (R)	Cladding wall thickness	Inches/meters	
THKGAP (R)	Pellet-cladding as-fabricated gap thickness	Inches/meters	
TIME(IT) (R)	Cumulative time at the end of each time step	Days	Limit 400 steps
TSINT (R)	Temperature at which pellets were sintered	F/K	Default = 2911 °F
TOTL (R)	The total (active) fuel column length.	Feet/meters	
TW(IT) (R)	Coolant inlet temperature. Enter a value for every time step if NSP = 1.	F/K	
VS (R)	Number of turns in the plenum spring	Dimensionless	
X(n) (R)	The elevations in each QF, X array defining a power shape. Note that the first value should be 0.0 and the last value must = TOTL.	feet/meters	

Table B-1. MATPRO Subroutines in FRAPCON-3

Subroutine name	Model	Comments
CAGROW	Cladding axial growth	Modified-uses Franklin model for PWR (Zr-4) and 0.5*Franklin for BWR (ZR-2).
CANEAL	Calculated general annealing of cladding coldwork as a function of temperature and fluence	Called from top of FRPCON, (before gas iteration loop) once per time step--uses the axial average current flux.
CANISO	Calculates coefficients of anisotropy to be used in stress-strain relationships for the cladding.	Not used. No call.
CBRTTL	Calculates cladding embrittlement due to oxygen absorption.	Not used. No call.
CCLAPS	Calculates a cladding collapse pressure.	Not used. No call.
CCP	Cladding specific heat at constant pressure	Not used. No call.
CCRPR	Cladding creep strain rate	Not used. Replaced by CREPR.
CELAST	Cladding elastic compliance constants, based on orientation parameters	Not used. No call.
CELMOD	Cladding Young's modulus	
CESIOD	Calculates cesium and iodine isotopes available in the gap	Not used. No call.
CFATIG	Fatigue constants and exponent for low and high cycle fatigue failure	Not used. No call.

Table B-1. MATPRO Subroutines in FRAPCON-3 (Continued)

Subroutine name	Model	Comments
CHITOX	Calculates Zr oxide and "xi" layer thicknesses--this is for high temperature oxidation only.	Not used. No call.
CHUPTK	Cladding hydrogen uptake	Modified to a pickup fraction of 15% for PWRs, based on data from EPRI and DOE fuel surveillance programs.
CKMN	Strength coefficient and exponent	Modified dependence on hydrogen content and fluence based on EPRI and DOE surveillance programs. Temperature and coldwork dependence unchanged.
CHSP	Addition of specific heat from dissolution of hydrides	Not used. No call.
CMHARD	Cladding Meyer hardness as a function of temperature	
COBILD	High-temperature oxidation--layer thickness.	Not used. No call.
CORROS	Cladding waterside corrosion	Modified--uses the 1987 EPRI/ ESCORE oxidation model for PWRs and BWRs.
CSHEAR	Calculates shear modulus of cladding based on type and conditions.	
CSIGMA	True stress as a function of true strain	Not used. No call.
CSRUPT	Fractional increase in cladding diameter upon rupture	Not used. No call.
CSTRAN	True strain as a function of true stress	Not used. No call.
CSTRES	Effective stress as a function of true strain	Not used. No call.
CSTRNI	True strain as a function of initial true strains and local current stresses	Not used. No call.
CTHCON	Cladding thermal conductivity	

Table B-1. MATPRO Subroutines in FRAPCON-3 (Continued)

Subroutine name	Model	Comments
CTHEXP	Cladding axial and diametral thermal expansion	
CIXTUR	Calculates texture orientation parameters from basal pole figure data.	Not used. No call.
EMCCP	EM model for cladding specific heat	Not used. No call.
EMCLEM	EM version of cladding elastic modulus	Not used. No call.
EMCPIR	Cladding Poisson's ratio	Not used. No call.
EMCTON	EM version of cladding thermal conductivity	Not used. No call.
EMCTXP	EM version of cladding thermal expansion.	Not used. No call.
EMFCP	EM version of fuel heat capacity	Not used. No call.
EMFEOD	EM version of fuel elastic modulus	Not used. No call.
EMFESS	EM version of fuel emissivity	Not used. No call.
EMFPIR	EM version of fuel Poisson's ratio	Not used. No call.
EMFTON	EM version of fuel thermal conductivity	Not used. No call.
EMFTXP	EM version of fuel thermal expansion	Not used. No call.
EMGTON	EM version of gas thermal conductivity	Not used. No call.
EMSTRN	EM version of cladding strain to rupture	Not used. No call.
FCP	Fuel specific heat	Includes effects of plutonia and effect of gadolinia added.
FCREEP	Fuel creep strain	Not used. No call.
FELMOD	Fuel elastic modulus	Not used. No call.
FEMISS	Fuel emissivity	
FFRACS	Fuel fracture stress	Not used. No call.

Table B-1. MATPRO Subroutines in FRAPCON-3 (Continued)

Subroutine name	Model	Comments
FGASRL	Fission gas release	Not used.
FHOTPS	Fuel hot pressing	Not used. No call.
FPOIR	Fuel Poisson's ratio	Not used. No call.
FRESTR	Fuel restructuring	
FSWELL	Fuel swelling	Modified to include solid-swelling only
FTHCON	Fuel thermal conductivity	Modified; changed to Lucuta (JNM 11/96) model plus PNNL additions for gadolinia effects and plutonia effects.
FTHEXP	Fuel thermal expansion	Not modified; but checked against other models.
FUDENS	Fuel densification	
FVAPRS	Fuel vapor pressure	Not used. No call.
GTHCON	Gas thermal conductivity	Includes gas mixtures. Now modified to MATPRO-11, Rev. 2 and unused Knudsen-range small-gap correction was eliminated.
GVISCO	Gas viscosity	
PHYPRP	Contains UO_2 and $(\text{U,Pu})\text{O}_2$ and zircaloy melting points and heats of fusion, and the zirconium and zircaloy alpha to beta phase transition temperatures.	
ZOEMIS	Zircaloy oxide emissivity	
ZOTCON	Zircaloy oxide layer thermal conductivity	Called from FRPCON.

Table B-2. Alphabetical Listing of FRAPCON-3 Subroutines not from MATPRO

File name	Description of subroutine or function
ANS54	Calculates fission gas release using ANS 5.4 standard.
AXHEF	Calculates axial power shape factors.
BES	Bessel functions used by radar.
BES2	Bessel functions used by tubrnp.
BURNUP	Calculated burnup for node j.
CCREP	Coordinates the cladding creep step. Calls fcmi, which calls cladf, which calls crepr.
CEXPAN	Calls cthexp--the cladding thermal expansion function.
CHECK	Checks input values and writes error messages.
CLADF	Calculates cladding deformation of the free-standing cladding, including creep. Calls cthexp, strain, and crepr.
CLADRP	Calculates cladding ΔT ; calls cthcon (cladding thermal conductivity function).
CLDGRO	Calculates cladding incremental axial growth; calls cagrow.
CLOCKX	Changes time to hh:mm:ss.
CONDOC	Calls gaprs. Outputs gap conductance and gap temperature drop.
COOLT	Calculated bulk coolant temperature and saturation temperature.
COUPLE	Outputs interfacial pressure. Calls strain, stress, and creep.
CRAP	Function that calculates effective stress as a function of creep rate strain.
CREEP	Finds correct value of stress for given creep increment.
CREPR	Calculates transverse cladding creep strain rate.
DRIVER	Calls iofiles, echol, and frpcon.
ECHOL	Writes the input echo into the output file.
EDATE	Returns date as dd-mm-yy.
EFFCON	Not accessible.
EMDNS	Function to calculate densification of fuel (EM option).
EMFTC	Function to calculate UO_2 thermal conductivity (EM option).
EMRLOC	Function to calculate relocation (EM option).
EMSSF2	Calculates emissivity factor for fuel-cladding gap. Calls zoemis.

Table B-2. Alphabetical Listing of FRAPCON-3 Subroutines not from MATPRO (Continued)

File name	Description of subroutine or function
ENERGY	Calculates fuel stored energy at volumetric average temperature.
ERFD	Error function (called by ANS54 only).
FCMI	Does elasto-plastic analysis. Calls cladf, gapcls, couple.
FENTHL	Function to calculate enthalpy of fuel relative to absolute zero.
FEXPAN	Calculates thermal expansion of the fuel. Calls fthexp.
FGASRE	Calculates gas release. Calls either massih or ans54.
FLMDRP	Calculates temperature drop across the film and the crud.
FLUXD	Calculates flux depression coefficients. Calls voidp and radar.
FLUXDP	Calculates flux depression (via RADAR or LASER). Not accessible.
FORMFA	Function to calculate fuel ring averaged form factor or burnup.
FRACAS	Calculates fuel and cladding mechanical states. Calls memset, fcmi, and fcmi2.
FRAFORT	Not accessible.
FRPCON	Calls all major subcodes: setup, tapegn, caneal, store, burnup, turbo, phypro, gaspro, coolt, flmdrp, corros, chuprk, cmlimit, cladp, fluxd, cexpan, cldgro, memset, tmprsub, fexan, swell, fracas, newgap, conduc, volume, gfasre, energy, totgas, plnt, gspres, gasplt, ccreep, lprt, print2, pltout, and restfs.
FUELTP	Calculates steady-state fuel temperatures. Calls fthcon and effcon.
GAPCLS	Finds the point of pellet-cladding gap closure for mechanical analysis if close to closure for a given time step and axial node.
GAPRS	Computes gap conductance. Calls emssf2, fthcon, chtcon, and gthcon.
GAPT	Function to calculate gap thickness. Calls cladf.
GASPLT	Outputs radioactive gas release predicted by ANS54.
GASPRO	Computes the fission gas and helium production.
GASREL	Removed from code.
GSPRES	Calculates rod internal gas pressure.
GRTLOC	Computes the radial outward relocation of the fuel pellet.
INITIAL	Initializes program. Calls nemsset, lacinp, check, turbin, and printl.
IOFILES	Reads input file. Calls EDATE and CLOCKX.

Table B-2. Alphabetical Listing of FRAPCON-3 Subroutines not from MATPRO (Continued)

File name	Description of subroutine or function
LACINP	Not used. Converts lace option input for matpro compatibility.
LPRT	Stores average stresses and strains for use in summary printout.
MASSIH	Fission gas release model based on Forsberg-Massih model.
MEMSET	Fills pointer arrays (real variables).
NEMSET	Fills pointer arrays (integer variables).
NEWGAP	Calculates new estimate of gap temperature drop.
PFHEAD	Prints out program version identification at the top of every page. Calls propid and edate.
PLNT	Calculates plenum temperature and hot plenum volume. Calls cthexp and cthcon and uses the fuel axial expansion from volume.
PLTINP	Prepares information for plotting. Calls pghead.
PLTOUT	Stores plot data. Calls opnplt, wrtint, wrtchro, wrtinta, and wrtdbla.
POINTER	Sets up index pointers. Calls nemset, fr2ptr, and setpnt.
POLATE	Function - guessing values.
PRINT1	Writes case setup output. Calls pghead.
PRINT2	Writes time-step and summary output. Calls pghead.
PROPID	Prints out property ID numbers at top of printout pages.
PWRDEP	Calculates radial power distribution based on LASER tables.
RADAR	Calculates array of relative radial power distribution as a function of burnup. Not accessible.
REPACK	Not accessible.
RESTFS	Writes output for restart.
SETPNT	Assigns correct pointer location ID.
SETUP	Reads and processes input and sets up pointers. Calls memset, nemset, pointer, inital, and axhef.
SIMQ	Solves simultaneous linear equations.
STORE	Stores converged values of parameters.
STRAIN	Calculates uniaxial strain. Calls cstres and cstran.

Table B-2. Alphabetical Listing of FRAPCON-3 Subroutines not from MATPRO (Continued)

File name	Description of subroutine or function
STRESS	Calculates stress. Calls cstress.
SWELL	Calculates fuel ring swelling and densification displacement. Calls fswell.
TAPEGN	Used if FRAPCON is reading or writing to a tape.
TERP	Function interpolates to find values.
TMPSUB	Calculates fuel temperature distribution. Calls fueltp.
TOTGAS	Calculates cumulative fission gas release, helium, and nitrogen for entire rod.
TUBRNP	Calculates Pu buildup and radial power and burnup profiles as a function of burnup.
TURBIN	Calculates initial concentrations of ^{235}U , ^{238}U and ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , and ^{242}Pu . Calls tubrnp.
TURBO	Calculates radial form factor used to calculate power and burnup. Calls tubrnp.
VOIDP	Calculates a H_2O void volume dependent value of "p" for radar.
VOLUME	Calculates rod internal void volume.