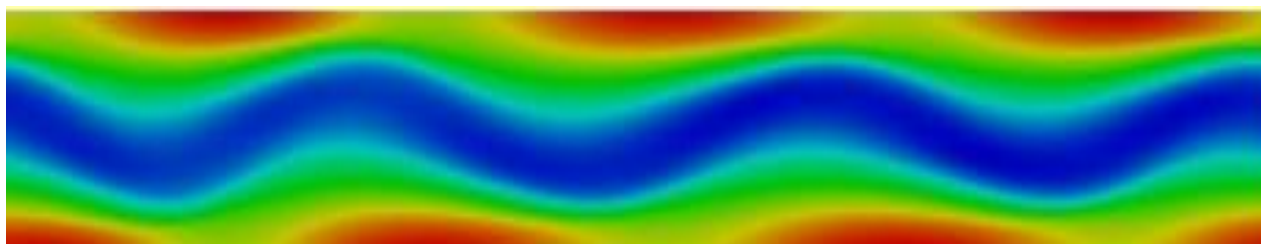




Walidacja metodologii CFD przepływu chłodziwa w gęsto upakowanej kasecie paliwowej

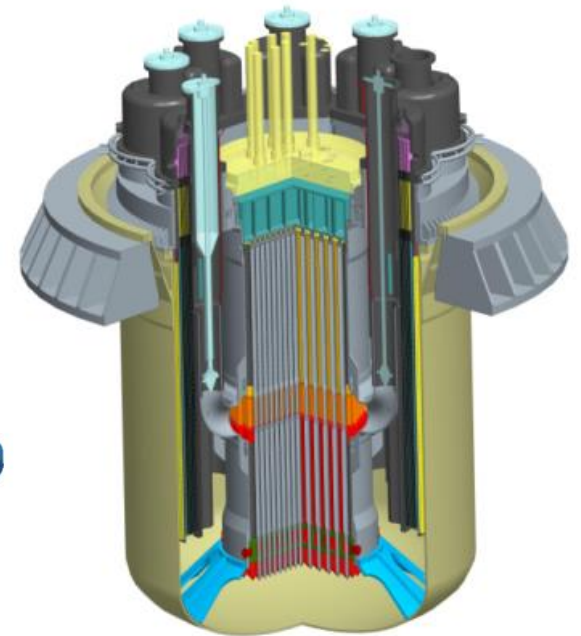
mgr inż. Tomasz Kwiatkowski

Zakład Energetyki Jądrowej i Analiz Środowiska
Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Otwock-Świerk, 16.02.2016



Wstęp

- Kluczowe czynniki wpływające na bezpieczeństwo reaktorów jądrowych, w których czynnikiem chłodzącym w obiegu pierwotnym jest ciekły metal (Liquid Metal cooled Fast Reactors – LMFRs) to:
 - spadek ciśnienia oraz wymiana ciepła
 - charakterystyka oscylacji przepływu chłodziwa, które mogą doprowadzić do interakcji ciecz-ciało stałe w rdzeniach LMFR z separatorami prętów
- **Kanały paliwowe reaktora ALFRED***
 - chłodzone ołowiem
 - duży współczynnik P/D
 - separatory pozycjonujące



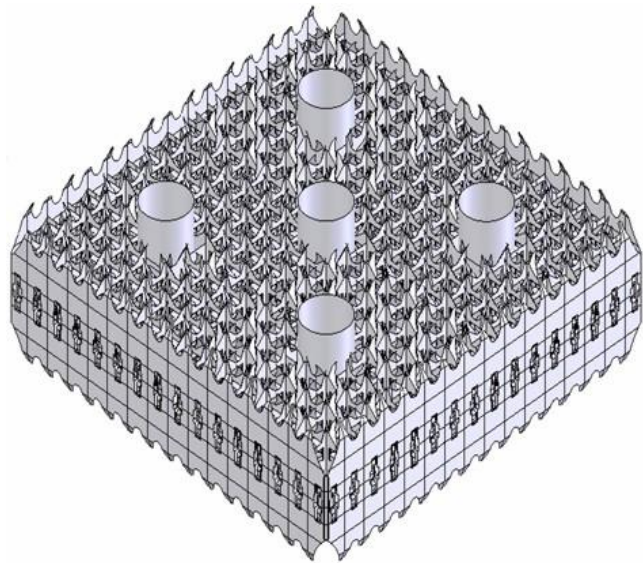
* ALFRED - The Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator

Wstęp

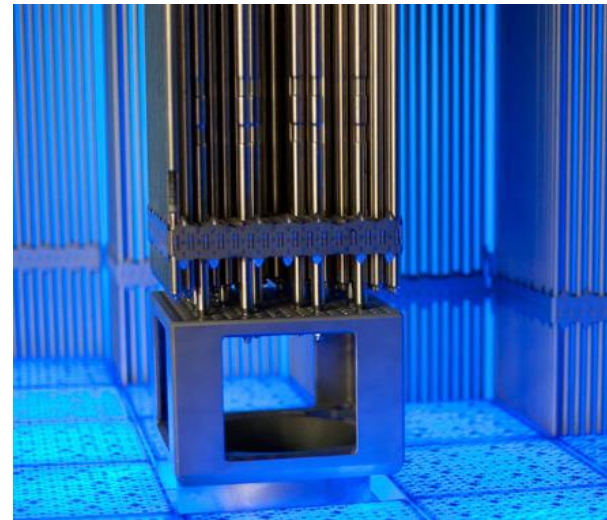
Wpływ separatorów pozycjonujących:

- przepływ osiowy chłodziwa w kasecie paliwowej może powodować wibracje wynikające z oddziaływania ciecz-ciało stałe

Pełne zrozumienie zagadnień wibracji jest szczególnie istotne przy określaniu kwestii wytrzymałości zmęczeniowej pastylek paliwowych jak i całych kaset paliwowych.



<http://www.ctresources.info/ccp/paper.html?id=3970>



<http://www.engin.umich.edu/college/about/news/stories/2012/november/nuclear-crud>

Wstęp

Zastosowanie podejścia CFD wymaga walidacji z danymi referencyjnymi!

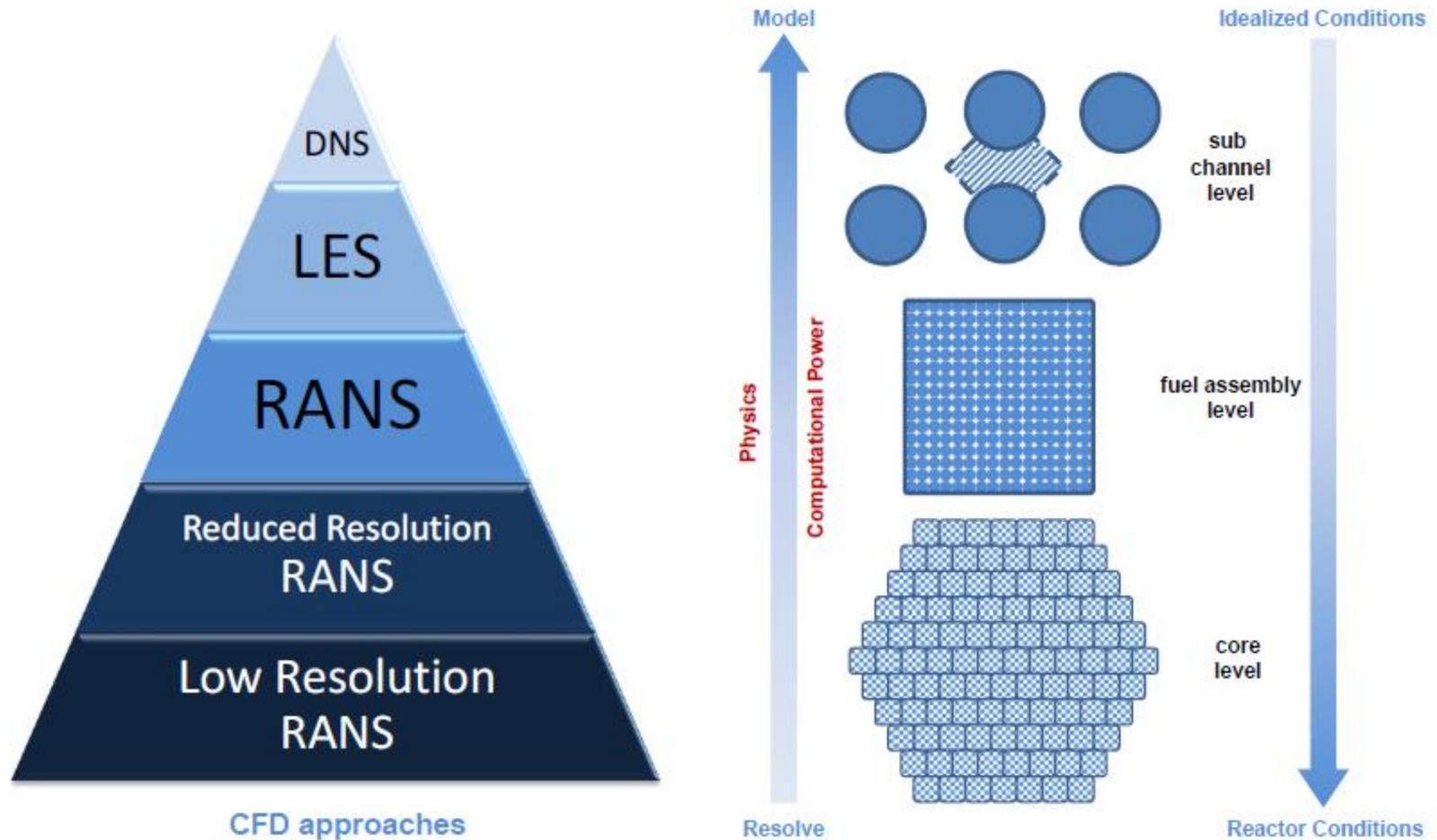
Brak danych referencyjnych dla kaset paliwowych do reaktora ALFRED:

- brak istotnych danych eksperymentalnych
 - niemożliwe do przeprowadzanie
 - zbyt kosztowne
- brak analiz CFD wysokiej wierności

Cel:

Kalibracja domeny obliczeniowej i przeprowadzenie analiz CFD w celu uzyskania optymalnej domeny obliczeniowej do analiz DNS, a w konsekwencji wytworzenia referencyjnej bazy danych wysokiej wierności do walidacji modeli RANS.

Metodologia CFD

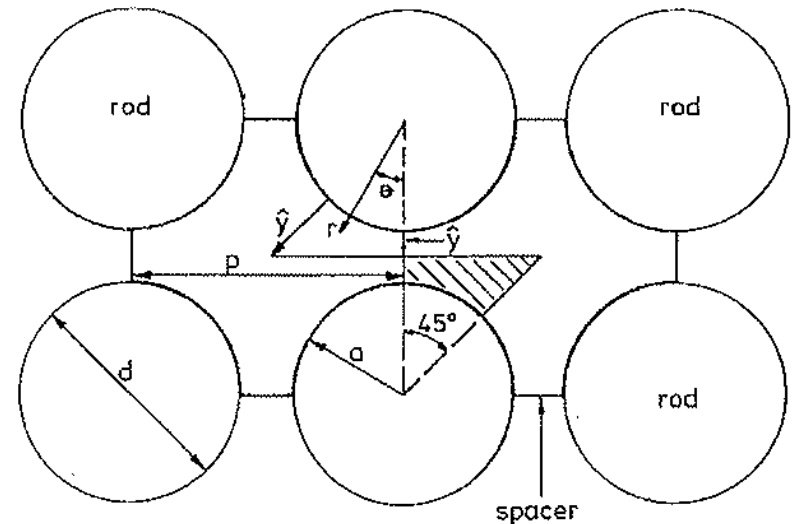


Metodologia CFD

Wybór geometrii sub-kanałowej dla dobrze udokumentowanego eksperymentu hydraulicznego dla pakietu prętów bez oporów hydraulicznych przeprowadzonego przez Hooper'a *

Weryfikacja modeli CFD dla zjawisk w skali sub-kanałowej – etapy:

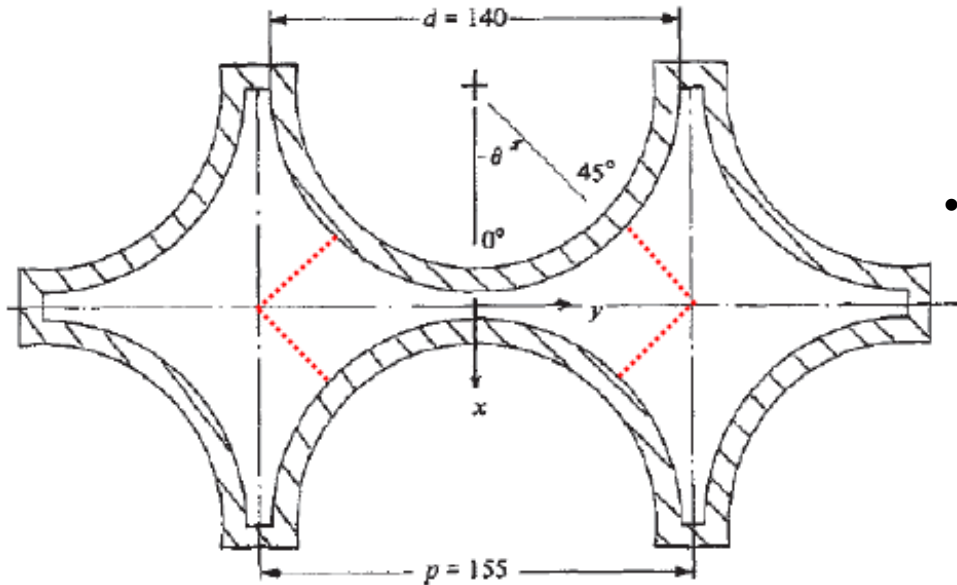
- siatkowanie
- dobór domeny obliczeniowej
- dobór warunków początkowych i brzegowych
- przeprowadzenie serii analiz RANS, w celu wyznaczenia skali czasowej Taylora i Kolmogorowa



J.D. Hooper and D.H. Wood, Fully developed rod bundle flow over a large range of Reynolds number, NED 83, 31-46 (1984)

* J. D. Hooper and K. Rehme, Large-scale effects in developed turbulent flow through closely-spaced rod arrays, *J. Fluid Mech.* **145**, 305-337 (1984)

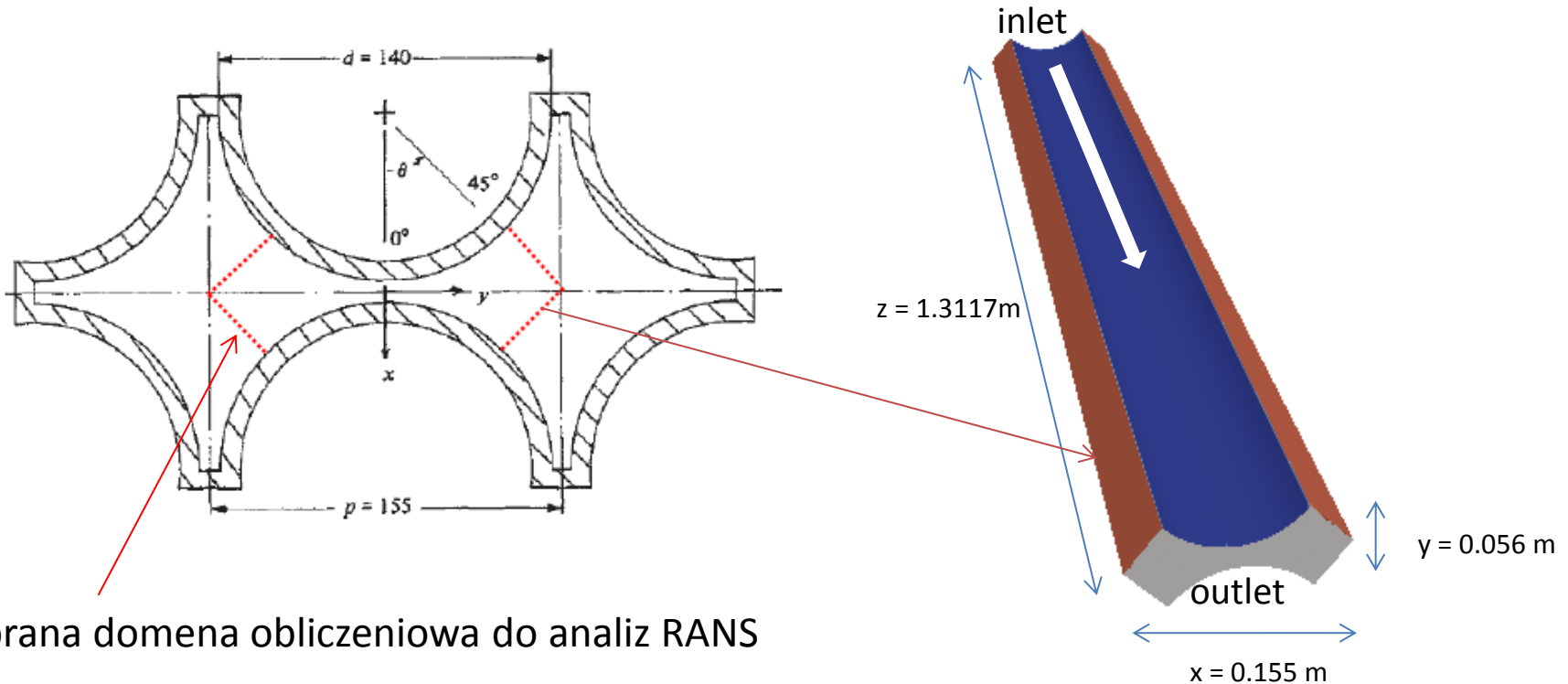
Hooper case - wprowadzenie



J. D. Hooper and K. Rehme, Large-scale effects in developed turbulent flow through closely-spaced rod arrays, *J. Fluid Mech.* **145**, 305-337 (1984)

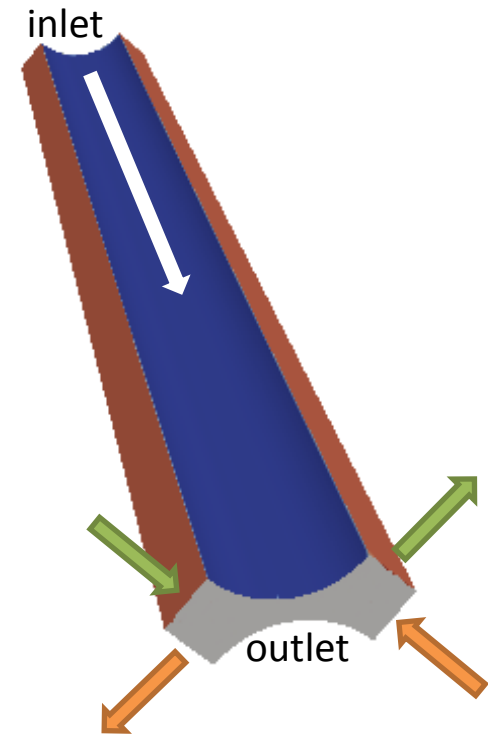
- Przepływ osiowy chłodziwa w ściśle upakowanych kasetach paliwowych wykazuje złożone zachowanie.
- Wraz z zmniejszaniem współczynnika pitch-to-diameter ($P/D = 1.107$) pole przepływu burzliwego w kasetach paliwowych znacznie odbiega od pola przepływu w jaki występuje okrągłej rurze.
- Pełne zrozumienie tych zjawisk nie jest do końca zbadane.

Hooper case – domena obliczeniowa



Warunki brzegowe i początkowe

- Stacjonarne warunki początkowe
- Chłodziwo: **powietrze** w warunkach standardowych
- Przepływ masowy: 0.052 kg/s
- Prędkość wlotowa: 10.3 m/s
- Gęstość: 1.18 kg/m³
- Lepkość: 1.85 x 10⁻⁵ kg/ms



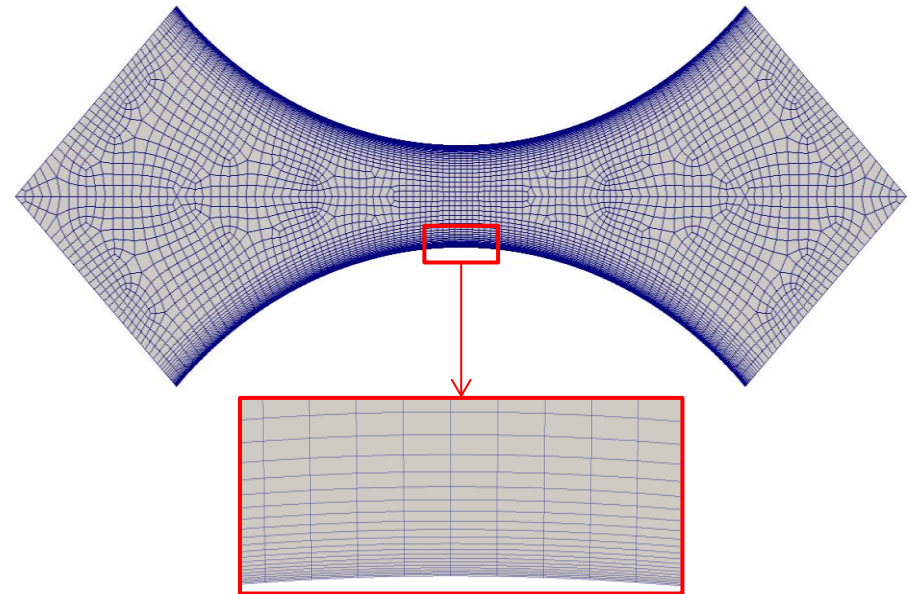
Warunki brzegowe:

- symetria
- ściana
- cykliczność

Siatka

Siatka została wytworzona w programie GAMBIT

Długość domeny	Liczba komórek (hexahedral)
2 lambda*	550 188
3 lambda	822 324
4 lambda	1 094 460
5 lambda	1 366 596
6 lambda	1 644 648



Przekrój przez siatkę

* Lambda – średnia długość fali oscylacji (0.318 m)

Analiza RANS

Kod	OpenFOAM 2.2.0
Model	k-omega SST
delta T:	1e-04

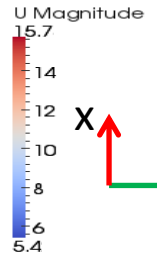
Przekrój wzdłuż osi -z

Położenie sondy

t=0.3s

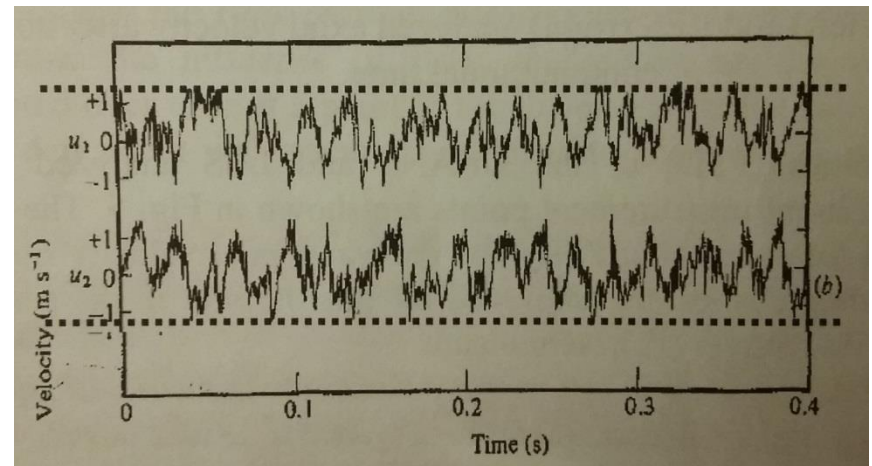
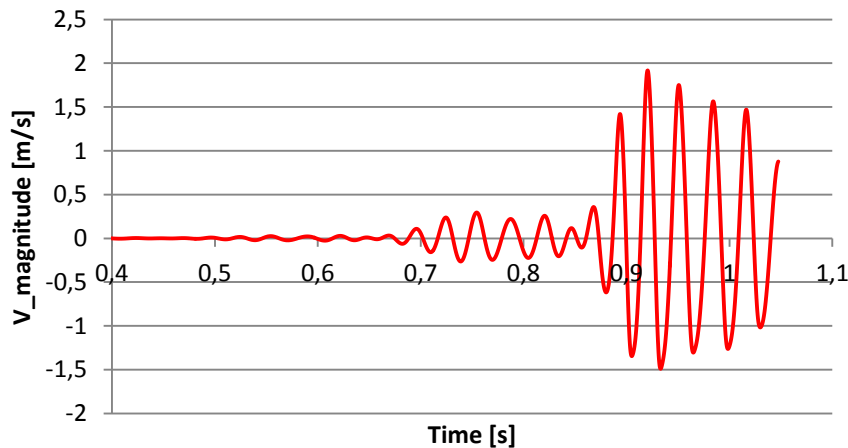
t=0.8s

t=1s



Średnia prędkość: symulacja vs. pomiar eksperymentalny[m/s]

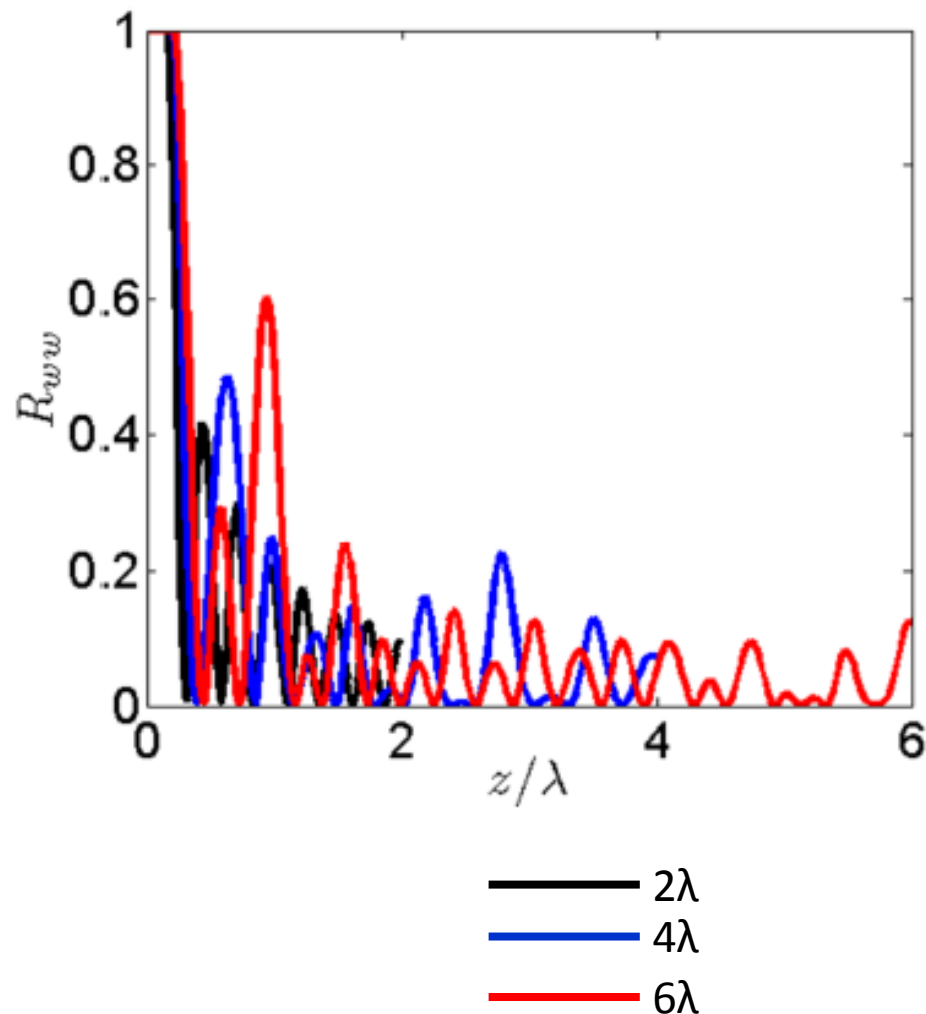
U_x



Kalibracja długości domeny

Makroskopowe procesy przepływu, np. wielkoskalowe oscylacje makroskopowe, są dobrze odwzorowane przez modele RANS. Oscylacje te ściśle korelują z periodycznymi oscylacjami przepływu zaobserwowanymi w eksperymencie Hoopera.

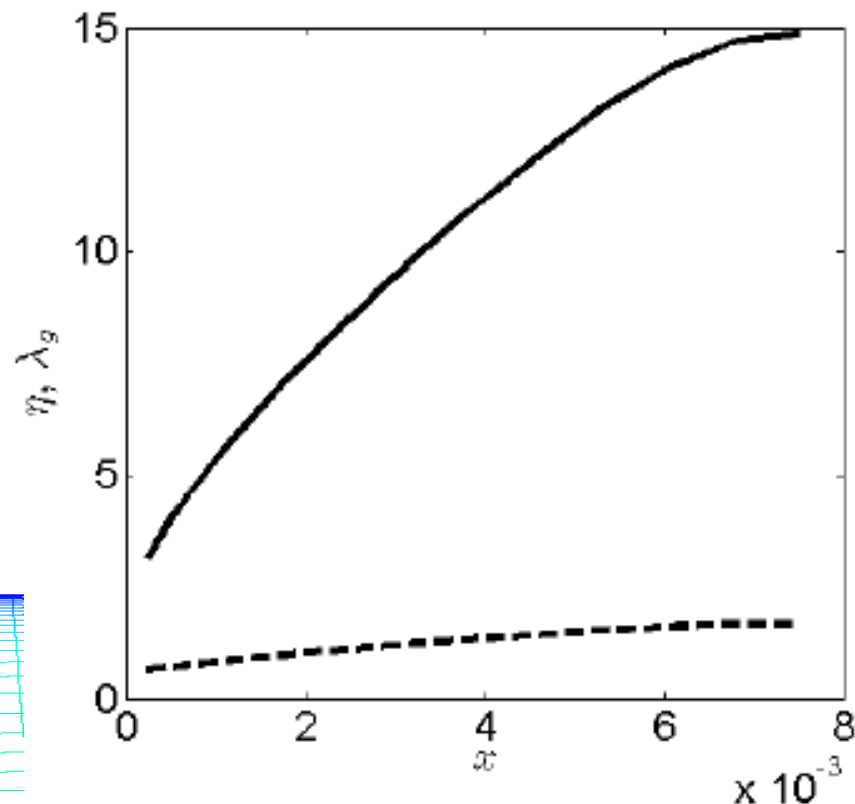
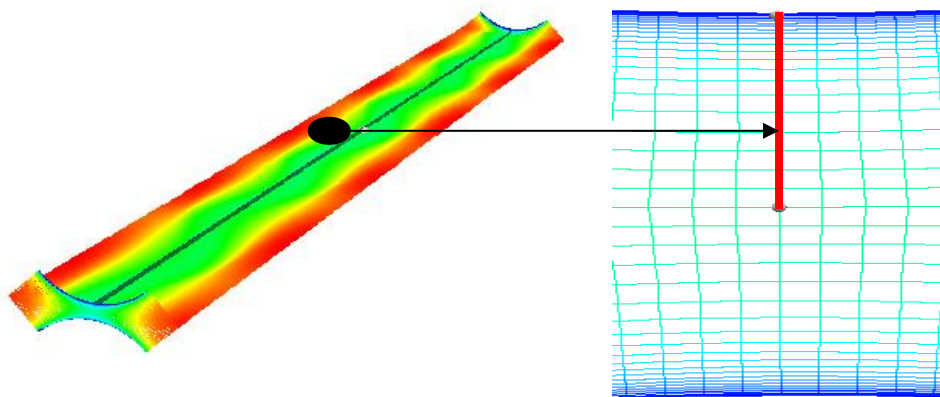
Warunek periodyczności użyty wzdłuż osi- z , zakłada statystyczną jednorodność przepływu, czyli m.in. niezależność wzdłuż osi- z .



Skale turbulencji

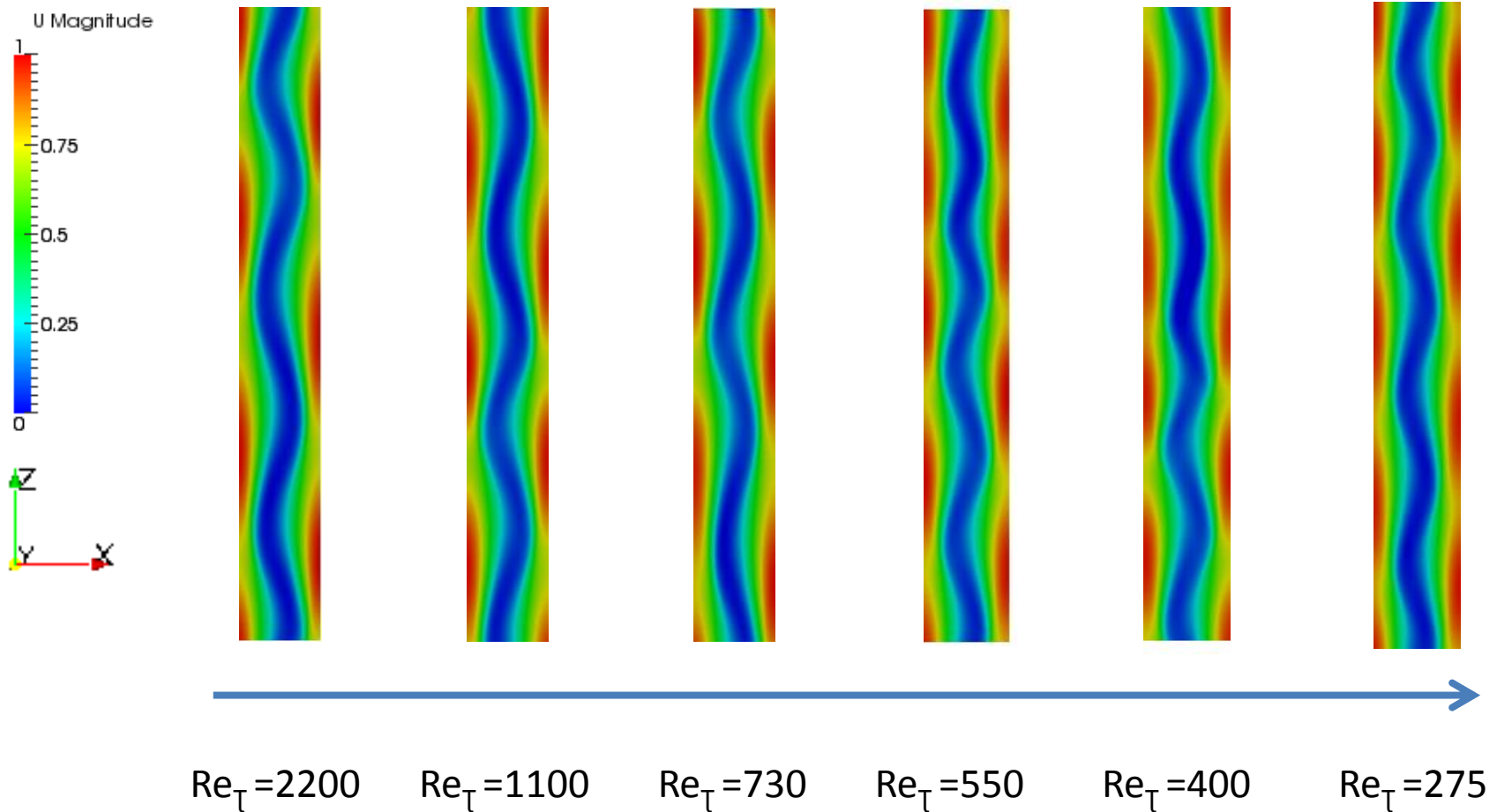
Do przeprowadzenia analiz **DNS** – ok **23 miliardów komórek!**

Aby określić rozsądną wielkość domeny obliczeniowej – z punktu widzenia zasobów komputerowych – przeprowadzono kalibrację przepływu masowego.



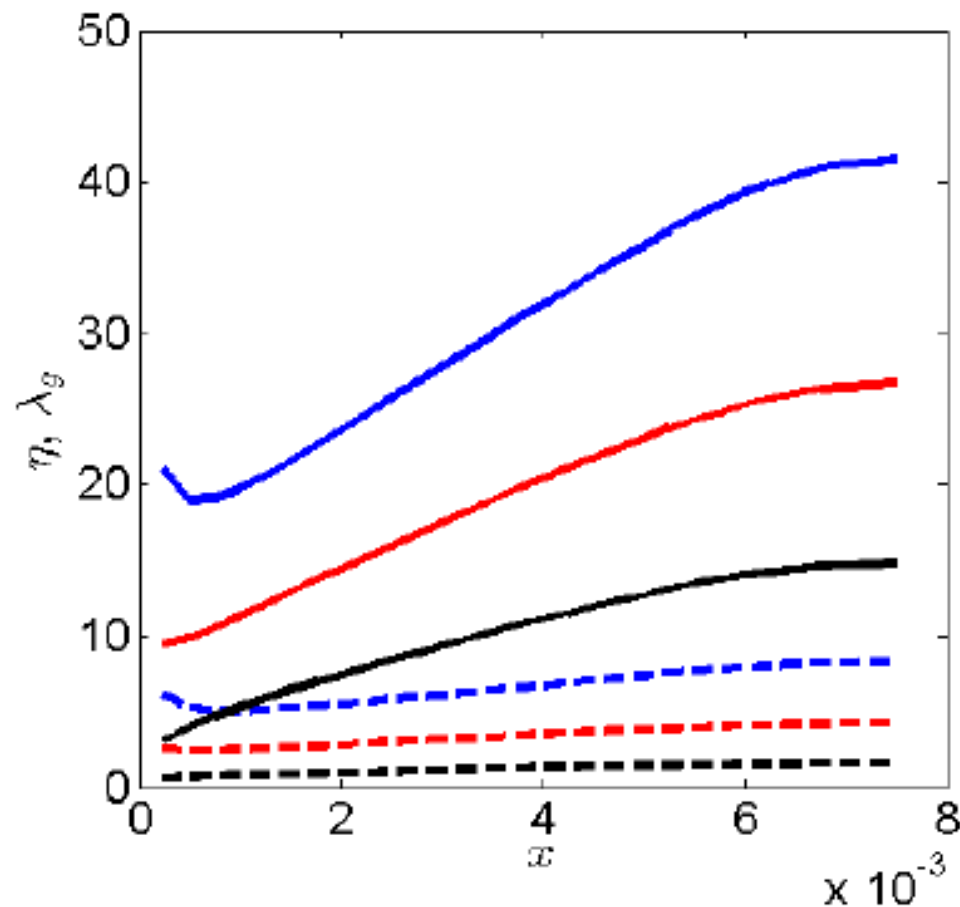
— mikroskala Taylora
- - - skala Kolmogorowa

Profile prędkości dla różnych Re_T



- Makroskopowy charakter przepływu jest zachowany
- Częstotliwość oscylacji wzrasta wraz z zmniejszaniem przepływu masowego ($0.052 \text{ kg/s} \geq \dot{m} \geq 0.0065 \text{ kg/s}$)

Skale turbulencji dla różnych Re_τ

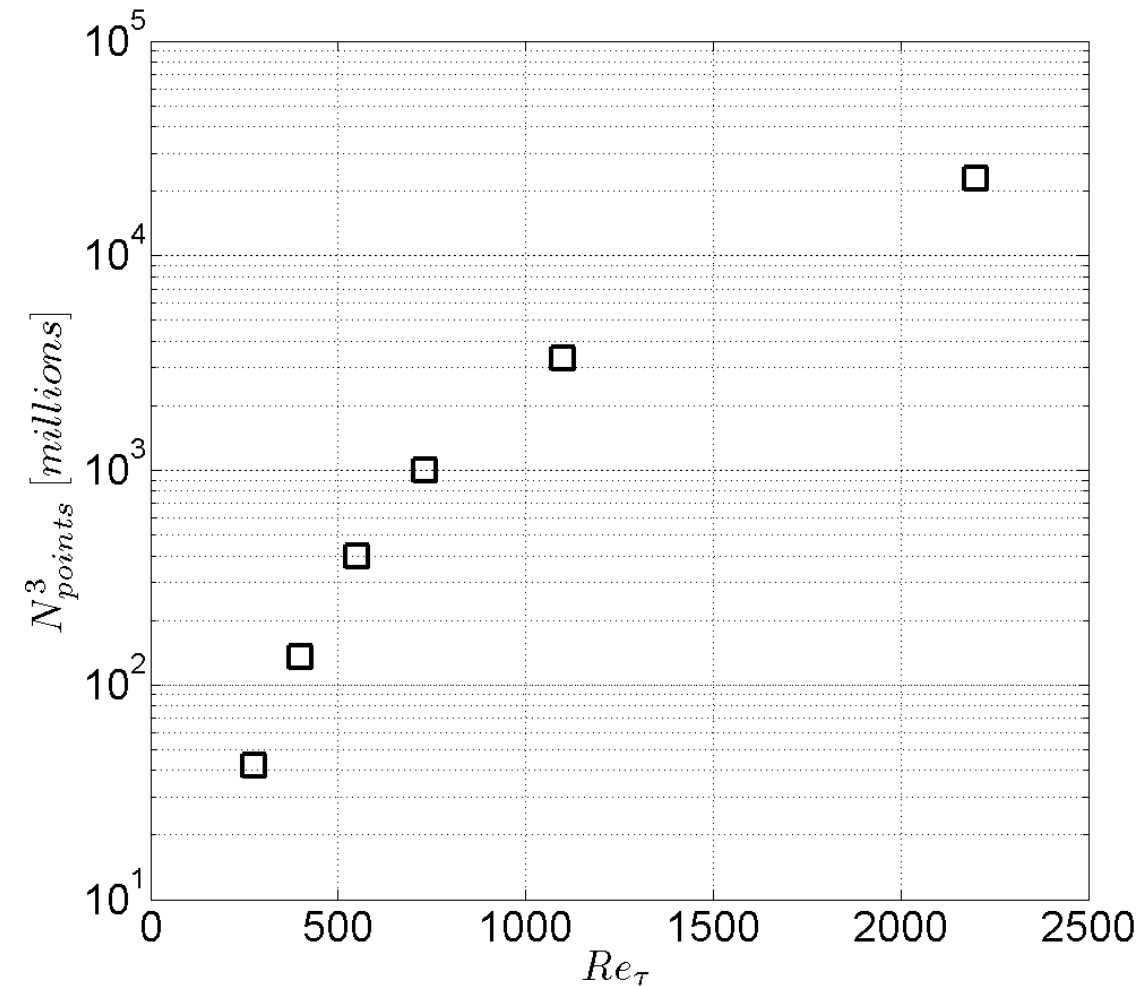


Przeskalowanie przepływu masowego na wlocie, pozwoliło na zmniejszenie wielkości domeny obliczeniowej do analiz DNS.

- $\dot{m} = 0.052 \text{ kg/s}$, $Re_\tau = 2200$
- $\dot{m} = 0.013 \text{ kg/s}$, $Re_\tau = 550$
- $\dot{m} = 0.0065 \text{ kg/s}$, $Re_\tau = 275$

Unormowane skale Kolmogorowa η – linie przerywane
Mikroskale Taylora λ_g – linie ciągłe

DNS dla Hoopera



$Re_\tau = 400$, $\dot{m} = 0.0094$ kg/s
– **135 milionów** komórek

$Re_\tau = 275$, $\dot{m} = 0.0065$ kg/s
– może doprowadzić do re-laminaryzacji przepływu

Analizę DNS należy przeprowadzić dla oryginalnej wielkości przekroju domeny eksperymentu Hoopera, która jest ok 4 razy większa od przetestowanej domeny w obliczeniach RANS, dlatego też wielkość domeny obliczeniowej dla analiz DNS wzrośnie z 135 do ok **540 milionów komórek!**

Podsumowanie

Odtworzono makroskopowe fluktuacje przepływu zaobserwowane podczas hydraulicznego eksperymentu Hoopera.

Przeprowadzono kalibrację domeny obliczeniowej pod kątem jej długości, jak również przeskalowano przepływ masowy na wlocie – przy zachowaniu tej samej liczby Reynoldsa co w eksperymencie, w celu oszacowania dokładności przestrzennej analiz wysokiej wierności.

Określono, że do przeprowadzenia analiz DNS potrzebna jest siatka zbudowana z 540 milionów komórek.

Analiza DNS pozwoli stworzyć bazę danych referencyjnych na podstawie, których możliwa będzie walidacja modeli RANS dla różnego rodzaju kaset paliwowych.

Współpraca z NRG

Wyjazd stażowy - 05.05 – 21.06.2014 r.

Prezentacja ustna na konferencji: **16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics**, 30.08- 04.09 2015, Chicago

CALIBRATION OF HIGH FIDELITY BARE ROD BUNDLE SIMULATIONS FOR VARIOUS PRANDTL FLUIDS

T. Cardoso de Souza, A. Shams, F. Roelofs
Nuclear Research and Consultancy Group (NRG)
Westerduinweg 3, PO Box 25, 1755 ZG Petten, The Netherlands
cardoso@nrg.eu, shams@nrg.eu, roelofs@nrg.eu

T. Kwiatkowski
National Center for Nuclear Research
ul. Andrzeja Soltana 7, 05-400 Otwock-Świerk, Poland
tomasz.kwiatkowski@ncbj.gov.pl

ABSTRACT

One of the key factors in the design of liquid metal cooled fast reactors (LMFRs) refers to the detailed knowledge of the coolant flow in the sub-channels of the fuel assemblies in the reactor's core. In fact, a thorough experimental investigation of the flow mixing and heat transport in such sub-channels is often impossible or quite costly to be performed. Due to these limitations, computational fluid dynamics (CFD)



Calibration of High Fidelity Bare Rod Bundle Simulations for Various Prandtl Fluids

T. Cardoso de Souza (NRG)

T. Kwiatkowski (NCBJ)

A. Shams, F. Roelofs (NRG)

shams@nrg.eu, roelofs@nrg.eu

NURETH-16, Chicago, USA
1 September 2015

EU DuC = N



Dziękuję!