

30 maja 2007

**Dokument Techniczny nr 1
dołączony do Konwencji
dotyczącej Europejskiego Ośrodka XFEL**

STRESZCZENIE
projektu technicznego XFEL (część A)
i
scenariusz szybkiego uruchomienia Europejskiego Ośrodka
Badań XFEL (część B)

Wprowadzenie

Projekt techniczny Ośrodka XFEL (TDR), przyjęty przez Komitet Sterujący XFEL w czerwcu 2006 r., przewiduje ośrodek obejmujący kompleks akceleratora dla energii elektronów do 20 GeV (17,5 GeV w standardowym wariantcie działania), pięć linii undulatorów z dziesięcioma stacjami doświadczalnymi i różnymi biurami, laboratoriami i budynkami ogólnej użyteczności rozmieszczonymi w trzech różnych miejscach. Streszczenie projektu technicznego jest przedstawione w części A tego załącznika do „Konwencji dotyczącej budowy i funkcjonowania Europejskiego Ośrodka Badań Laserem Rentgenowskim na Swobodnych Elektronach” (Konwencja XFEL).

Całkowity koszt projektu Ośrodka XFEL jak go przedstawiono w streszczeniu Projektu Technicznego (TDR) oraz w załączniku 3 do Konwencji XFEL wynosi 1081,6 milionów euro, z czego 38,8 miliona euro przypada na fazę przygotowawczą, 986,4 miliona euro na budowę i 56,4 miliona euro na uruchomienie (wszystko w cenach 2005 r.). W celu możliwie najszybszego rozpoczęcia budowy Strony Konwencji uzgodniły, że ośrodek będzie realizowany etapowo, z początkowymi zobowiązaniami pokrywającymi tylko koszty pierwszego etapu. Koszty budowy w pierwszym etapie zostały określone na w przybliżeniu 850 milionów euro (zamiast 986,4 milionów euro).

W części B tego załącznika są zwięźle przedstawione charakterystyki scenariusza szybkiego uruchomienia Ośrodka XFEL. Wspomniana konfiguracja, odpowiadająca kosztom budowy w wysokości 850 milionów euro, jest opisana; ta konfiguracja nie jest unikalna i alternatywna, wszystkie te, których koszty budowy nie przekraczają 850 milionów euro są także zilustrowane. Granica czasu na podjęcie końcowej decyzji dotyczącej przyjęcia określonej konfiguracji jest również wskazana. Wszystkie rozwiązania alternatywne dają się rozszerzyć do pełnej wersji ośrodka opisanej w

projekcie technicznym.

Część A

Dokument Techniczny nr 1

STRESZCZENIE **projektu technicznego XFEL (część A)**

Streszczenie

1. Podstawowe cele

Sprawozdanie zawiera pełny opis techniczny instalacji Europejskiego Rentgenowskiego Lasera z Wolnymi Elektronami [European X-ray Free-Electron Laser Facility] – nowego międzynarodowego projektu infrastruktury naukowej, która ma zostać wybudowana na północny zachód od Hamburga. Celem instalacji jest generowanie *wyjątkowo jasnych* (szczytowa luminancja $\sim 10^{33}$ fotonów/s/mm²/mrad²/0.1%BW), *ultrakrótkich* (~ 100 fs) impulsów *przestrzennie spójnych* promieni rentgenowskich o długościach do 0,1 nm, oraz wykorzystanie ich w rewolucyjnych doświadczeniach naukowych w szeregu dyscyplin, od fizyki przez chemię i materiałoznawstwo po biologię. Projekt zawiera instalację podstawową oraz środki ułatwiające jej przyszłe rozszerzenia i usprawnienia, w ramach przygotowania dalszych postępów w odnośnych technologiach. Podstawowym procesem, który wybrano do generowania impulsów rentgenowskich jest samowzmacniająca emisja spontaniczna (SASE - Self-Amplified Spontaneous Emission), która generuje wiązki elektronów w dziale o wysokiej jasności, a te z kolei uzyskują wysoką energię (do 20 GeV) dzięki zastosowaniu nadprzewodnikowego akceleratora liniowego i przechodzą do długich (do ~ 200 m) undulatorów, gdzie generowane są promienie rentgenowskie. Pięć linii promienia fotonowego dostarcza impulsów rentgenowskich do dziesięciu stacji doświadczalnych, gdzie najnowszy sprzęt udostępniany jest do badań. Po tej nowej instalacji można się spodziewać nowych wyników o fundamentalnym znaczeniu w dziedzinach fizyki materiałowej, fizyki plazmy, nauce o planetach i astrofizyce, chemii, biologii strukturalnej i biochemii, które będą mogły wywrzeć wpływ na takie technologie jak fuzja termojądrowa, kataliza, spalanie (i jego aspekty środowiskowe), jak też na technologie biomedyczne i farmaceutyczne. Dzięki zastosowaniu technologii akceleratora nadprzewodnikowego, pomimo konkurencji ze strony projektów amerykańskich i japońskich, Europejska Instalacja Rentgenowskiego Lasera z Wolnymi Elektronami umożliwi Europie zachowanie wiodącej pozycji w naukach podstawowych i stosowanych z wykorzystaniem źródeł światła opartych o akceleratory, pozycji, którą uzyskała we wczesnych latach 90-tych w wyniku wybudowania i uruchomienia Europejskiego Ośrodka Promieniowania Synchrotronowego (ESRF - European Synchrotron Radiation Facility) w Grenoble.

2. Historia projektu

Podstawowa technologia u podstaw Europejskiego Ośrodka Rentgenowskiego Lasera z Wolnymi Elektronami [XFEL] to technologia nadprzewodnikowego akceleratora liniowego, rozwinięta w międzynarodowej współpracy, koordynowanej przez laboratorium DESY w Hamburgu, której pierwotnym celem było stworzenie Teraelektronowoltowego Nadprzewodzącego Akceleratora Liniowego (TESLA - Tera-Electronvolt Superconducting Linear Accelerator) – elektronowo-pozytronowego zderzacza linowego o energii rzędu TeV do celów badań z zakresu fizyki cząstek (stąd nazwa technologia TESLA.) Szybko okazało się, że tego typu nowatorski akcelerator liniowy miał idealne charakterystyki na potrzeby rentgenowskiego lasera z wolnymi elektronami. Propozycje wybudowania lasera z wolnymi elektronami, najpierw jako odgałęzienia liniowego zderzacza, a później jako osobnej instalacji, były przedkładane przez DESY rządowi niemieckiemu. Podjęto budowę instalacji testowej (TESLA Test Facility 1 lub TTF1) i w roku 2000 z powodzeniem uzyskano spójne impulsy o długości do ~ 90 nm. Instalacja TTF2 miała bardziej ambitne zadanie przejścia do długości fali rzędu 6 nm, przy wykorzystaniu akceleratora liniowego 1 GeV. Cel ten powinien zostać osiągnięty w 2007. W międzyczasie osiągnięto trwałe przyspieszenie elektronów do 0,75 GeV przy długości 32 nm (styczeń 2005) i 13 nm (kwiecień 2006), a w sierpniu 2005 rozpoczęto intensywny program użytkowy w hali doświadczalnej w dolnym biegu lasera z wolnymi elektronami, dzięki czemu utworzono to, co nazywamy obecnie instalacją FLASH.

W roku 2003, rząd niemiecki zdecydował o uruchomieniu propozycji ustanowienia Europejskiego Ośrodka budowy i wykorzystania rentgenowskiego lasera z wolnymi elektronami w Hamburgu, podejmując zobowiązanie finansowania nowej instalacji poprzez pokrycie do 60% kosztów jej budowy oraz do 40% kosztów jej wykorzystania. Wybór lokalizacji w Hamburgu motywowany jest możliwością wykorzystania unikatowych doświadczeń i wiedzy know-how Działu Maszyn DESY w dziedzinie nadprzewodnikowych akceleratorów liniowych oraz możliwość uzyskania bezpośrednich doświadczeń w obsłudze lasera FEL za pośrednictwem instalacji FLASH.

3. Przypadek naukowy oraz kontekst międzynarodowy rentgenowskiego lasera FEL

Wszystkie nauki przyrodnicze korzystają z fotonów (fal świetlnych) o różnych długościach przy badaniu zjawisk przyrodniczych. Wykorzystanie światła podczerwonego, widzialnego i ultrafioletowego zostało zrewolucjonizowane przez wynalezienie laserów gazowych oraz laserów na ciele stałym, zapewniających wysoką jasność, spójność przestrzenną oraz – w ostatnich latach – ultrakrótkie impulsy o długości do kilku femtosekund (1 femtosekunda lub 1 fs to jedna kwadrylionowa część sekundy, czyli 10^{-15} s; światło przebiega odległość $0,3 \mu\text{m}$ w czasie 1 fs). Ta skala czasowa jest szczególnie istotna, ponieważ atomy w molekułach i ciałach stałych oscylują wokół pozycji równowagi z typowym okresem obiegu rzędu kilkuset fs. Ogólnie rzecz biorąc, ruchy atomów podczas ich przemieszczeń w trakcie reakcji chemicznych lub transformacji fazowych również mają miejsce w takiej skali czasowej.

W zakresie fal o długości od ultrafioletu przez miękkie i twarde promieniowanie rentgenowskie dokonano ogromnych postępów z wykorzystaniem promieniowania synchrotronowego: jasnej emisji elektronów lub pozytronów, orbitujących w akceleratorze kołowym. Promieniowanie synchrotronowe ma jednak znacznie mniejszą jasność niż potężny laser, ma ograniczony stopień spójności przestrzennej i wytwarzane jest zwykle w impulsach o długości rzędu $\sim 30 \text{ ps} = 30\,000 \text{ fs}$. Celem nowoczesnych projektów budowy rentgenowskich laserów z wolnymi elektronami jest rozszerzenie tej rewolucji naukowej i technologicznej – wywołanej przez lasery w zakresie promieniowania widzialnego – na zakres promieniowania rentgenowskiego i osiągnięcie spójnych impulsów o długości $< 100 \text{ fs}$ przy mocy szczytowej rzędu wielu GW.

Jak potwierdzają dyskusje w trakcie czterech międzynarodowych spotkań warsztatowych, zorganizowanych od października 2005 do marca 2006 w Hamburgu, Paryżu, Kopenhadze i w pobliżu Oxfordu, wyjątkowe własności wiązek wytwarzanych przez Europejski laser XFEL (spójność, ultra-wysoka jasność oraz struktura czasowa) oraz rozwój odpowiednich detektorów i oprzyrządowania umożliwią przeprowadzanie zupełnie nowych doświadczeń. Kilka przykładów omówiono poniżej.

Spójność można wykorzystać do tworzenia obrazów holograficznych oraz bezsoczewkowego tworzenia obrazów w materiałoznawstwie i biologii. Spektakularne możliwości otwierają się – co przewidują szczegółowe badania teoretyczne i symulacje – dzięki wykorzystaniu pojedynczego bardzo krótkiego i intensywnego impulsu rentgenowskiego, wytwarzanego przez instalację XFEL: pojawia się możliwość zapisu wzorca dyfrakcyjnego dużej makromolekuły, wirusa lub komórki, która nie charakteryzuje się okresowością krystaliczną. Wyeliminowałoby to wąskie gardło z wielu systemów budzących duże zainteresowanie, np. tych do badania białek błonowych, wirusów i genomów wirusowych. Pomiary nadpróbkowanego wzoru dyfrakcyjnego promieniowania rentgenowskiego umożliwią określenie faz a zatem ustalenie struktury. Choć poszczególne próbki zostaną zniszczone przez bardzo intensywny impuls rentgenowski, możliwe będzie zebranie danych trójwymiarowych, gdy kopie reprodukowalnej próbki zostaną kolejno wystawione na działanie wiązki.

Wysokie natężenie można również wykorzystać do uzyskiwania wysoce zjonizowanych stanów

atomów, generując w warunkach laboratoryjnych procesy zachodzące w gazach międzygwiazdnych.

W związku z ultrakrótkim czasem trwania, impuls można wykorzystać w doświadczeniach pompująco-sondujących, gdzie impulsy lasera konwencjonalnego (układ pompujący) wykorzystywane są do wyzwolenia reakcji chemicznej lub przejścia fazowego, zaś impulsy laser XFEL (sonda), następujące z dokładnie określonym opóźnieniem (do ~50 fs do okresów rzędu ns lub nawet μ s) po każdym impulsie układu pompującego, dostarczają możliwości "filmowania" przemieszczeń atomowych i reorganizacji wiązań chemicznych. W ten sposób można wyjaśniać mechanizmy katalityczne w reakcjach chemicznych i biochemicznych, reakcje krótkotrwałe (np. spalanie) można poddać szczegółowemu badaniu, zobrazować można zarodkowanie faz uporządkowanych na przejściach międzyfazowych, jak też można badać doświadczalnie stany materii do tej pory niedostępne dla badaczy. Jeśli impuls mechanizmu pompującego jest wystarczająco silny do wytworzenia plazmy, impuls rentgenowski wciąż może przenikać wysoce zjonizowane medium (nieprzezroczyste dla światła widzialnego) i dostarczać informacji o rozprzestrzenianiu się czoła fali uderzeniowej, o ewolucji rozkładu temperatury i ciśnienia, o równaniu stanu.

Jak już podkreślono, potencjalna waga przełomów naukowych tego kalibru wykracza poza badania podstawowe, w dziedzinę technologii o zasadniczym znaczeniu dla Europy. Nie byłoby roztropnym pozostawić bez odpowiedzi konkurencyjny projekt amerykański (projekt LCLS – Linac Coherent Light Source – w Stanfordzie jest już bardzo zaawansowany) czy japoński (projekt SCSS – Spring-8 Compact SASE Source – uzyskał finansowe zielone światło już w 2006). Choć projekty te już zostały rozpoczęte i najprawdopodobniej zostaną zakończone wcześniej, wykorzystanie technologii nadprzewodnikowego akceleratora w Europejskiego OśrodkaXFEL umożliwia wytwarzanie 30 000 impulsów rentgenowskich na sekundę (a prawdopodobnie w przyszłości nawet więcej), w porównaniu ze 120 impulsami na instalacji LCLS i 60 impulsami na instalacji SCSS. Oprócz tej kluczowej przewagi technicznej, redukującej czas konieczny do przeprowadzenia niektórych doświadczeń nawet o dwa rzędy wielkości, wartościowe doświadczenia uzyskane na instalacji FLASH mogą znacznie wspomóc szybkie rozpoczęcie naukowego wykorzystania instalacji. Jeśli projekt Europejskiego OśrodkaXFEL zrealizuje harmonogram porównywalny z harmonogramami projektów konkurencyjnych, może zająć wiodącą pozycję w tej dziedzinie badań.

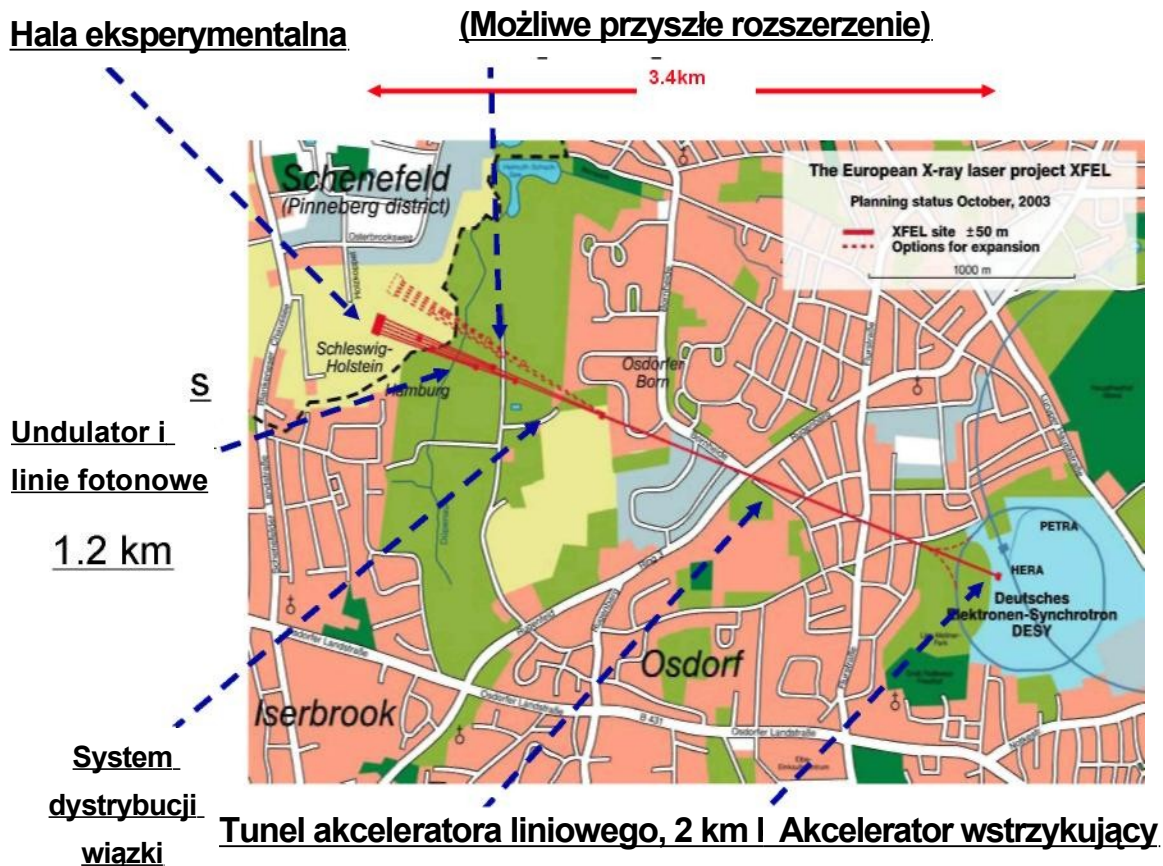
Europejskie laboratorium w Hamburgu, wykonujące eksperymenty z zakresu fizyki i zastosowań twardego promieniowania rentgenowskiego wytwarzanego za pomocą lasera z wolnymi elektronami, stanowiłoby uzupełnienie innych projektów europejskich, kładących nacisk na badanie rentgenowskiego wycinka spektrum promieniowania, i przyniosłoby korzyści wszystkim poprzez rozwijanie i dzielenie się wspólnymi technologiami.

4. Rozkład przestrzenny i cele operacyjne instalacji

Główne komponenty Instalacji to (zob. Rys. 4.1):

- akcelerator wstrzykujący
- akcelerator liniowy
- system dystrybucji wiązki
- undulatory
- linie promienia fotonowego
- oprzyrządowanie w Hali Doświadczalnej.

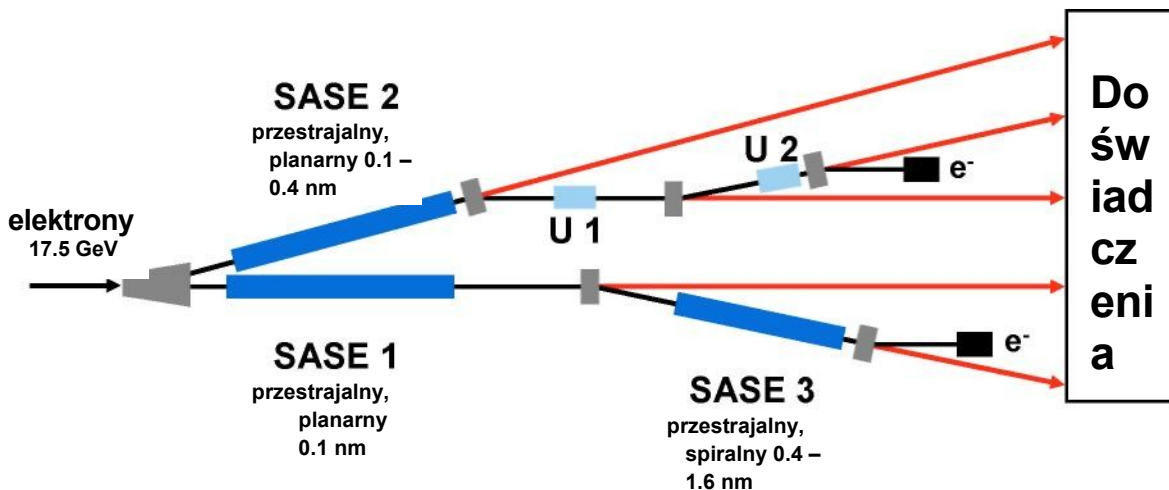
Komponenty te są rozmieszczone liniowo, na długości 3,4 km, począwszy od kampusu DESY w północno-zachodniej części miasta Hamburg a skończywszy w sąsiednim Schleswigu-Holsztynie, na południe od miasta Schenefeld, gdzie zlokalizowana jest Hala Doświadczalna.



Rysunek 4.1: Schemat rozkładu głównych komponentów Europejskiego Ośrodka XFEL.

Podstawowe funkcje głównych komponentów zostały opisane pokrótce poniżej. W akceleratorze liniowym wiązki elektronów są wydobywane ze stałej katody za pomocą promienia laserowego, a następnie przyspieszane w dziale elektronowym działającym w częstotliwościach radiowych i kierowane do akceleratora liniowego z energią wyjściową 120 MeV. W akceleratorze liniowym, składającym się z sekwencji nadprzewodnikowych modułów przyspieszających długości 1,6 km, magnesów sterujących i ogniskujących oraz sprzętu diagnostycznego, elektrony są przyspieszane do energii rzędu 20 GeV (przewiduje się energię 17,5 GeV dla standardowego trybu działania instalacji XFEL). Wzdłuż akceleratora umieszczone są dwa stopnie kompresji wiązki, w celu wytworzenie krótkich i bardzo gęstych wiązek elektronów, koniecznych do wyzwolenia procesu samowzmacniającej emisji spontanicznej (SASE). Na końcu akceleratora liniowego poszczególne wiązki elektronów są kanalizowane w jedną z dwóch linii elektronowych za pomocą systemu dystrybucji wiązki (Rys. 4.2). Wiązki elektronów wpuszczane w linię elektronową 1 przechodzą przez undulatory SASE1 oraz SASE3, wytwarzając twarde fotony promieniowania rentgenowskiego o długości 0,1 nm (SASE1) i bardziej miękkie fotony o długości fali 0,4-1,6 nm (SASE3), w procesie samowzmacniającej emisji spontanicznej wolnych elektronów. Po przejściu przez SASE3, elektrony są odchylane w kierunku wiązkołapu. Wiązki elektronów wpuszczane w linię elektronową 2 przeprowadzane są przez undulator SASE2, gdzie wytwarzane są fotony twardego promieniowania rentgenowskiego o długości 0,1-0,4 nm. Dalej przechodzą przez undulatory U1 i U2, zanim zakończą bieg w drugim wiązkołapie. W U1 i U2, fotony bardzo twardego promieniowania rentgenowskiego (długości fali odpowiednio do 0,014 i 0,06 nm) są generowane w procesie emisji spontanicznej. Fotony wygenerowane przez pięć undulatorów przenoszone są przez odpowiednią linię promienia fotonowego do Hali Doświadczalnej, gdzie są wprowadzane do dziesięciu stacji doświadczalnych.

Redukując energię elektronów na końcu akceleratora spowodowałyby wygenerowanie dłuższych fal, gdyby były potrzebne w jakichś doświadczeniach. Dla przykładu, energia elektronów rzędu 10 GeV odpowiadałaby promieniowaniu rentgenowskiemu o długości fali 4,9 nm, uzyskiwanemu z undulatora SASE3.



Rysunek 4.2: Schemat rozgałęziania linii promienia elektronów (czarny) i fotonów (czerwony) przez różne undulatory samowzmacniającej emisji spontanicznej (SASE) oraz emisji spontanicznej. Linie wiązek elektronowych kończą bieg w dwóch wiązkolapach, zaś linie promieni fotonowych w Hali Doświadczalnej.

Instalacja i oddanie do eksploatacji akceleratora, undulatorów, linii promieni oraz stacji doświadczalnych będzie się odbywało stopniowo, zgodnie ze strategią osiągania pośrednich i ostatecznych celów instalacji, która została ustalona w konsultacji z Grupą Roboczą ds. Naukowych i Technicznych (STI /Scientific and Technical Issues/ Working Group).

Pierwsza linia promienia elektronów oraz undulator SASE1 zostaną zainstalowane najpierw. Oddanie do użytku akceleratora i undulatora SASE1, linii promienia oraz pierwszej stacji planowane jest równoległe z instalacją drugiej gałęzi strumienia elektronów, aż do osiągnięcia pierwszego zastawu celów pośrednich (zob. tabela 4.1).

Zgodnie z zaleceniami Grupy Roboczej STI, przyjęto poniższe kryteria rozpoczęcia eksploatacji kompleksu akceleratora oraz radiatorów SASE oraz linii promienia:

- Kompleks akceleratora i SASE1 rozpoczyna działanie, gdy na SASE1 uzyskany zostanie promień fotonów o pośrednich wartościach, pokazanych w Tabeli 4.1, i zostanie zainstalowany i oddany do użytku sprzęt wystarczający do przeprowadzenia pierwszych eksperymentów naukowych.
- SASE2 rozpoczyna działanie, gdy spełnione zostaną takie kryteria jak powyżej dla fal o długości od 0,2 do 0,4 nm.
- SASE3 rozpoczyna działanie, gdy spełnione zostaną takie kryteria jak powyżej dla fal o długości od 2 do 6 nm.

Biorąc pod uwagę pozytywne doświadczenia z instalacją FLASH, działania zmierzające do realizacji ostatecznych celów projektowych na wszystkich liniach promieni będą postępowały równoległe z wczesnymi fazami eksploatacji, gdy tylko powyżej wskazane kryteria zostaną spełnione.

Parametr	Wartości pośrednie SASE1	Docelowe wartości projektowe SASE1	Jednostki
Długość fali	< 0.2	0.1	nm
Jasność szczytowa	1030	5×1033	fotony/s/mm2/mrad2/0.1%BW
Rozmiar na próbce (bez optyki)	< 1.0	~ 0.6	mm2, FWHM
Stabilność pozycji	50	10	% rozmiaru wiązki, rms
Stabilność energii fotonu	~ 0.1	~ 0.1	%
Fluktuacje natężenia między strzałami	Do współczynnika 10	0.3 - 0.5	Bezwymiarowy Szczyt-do-szczytu

Tabela 4.1: *Pośrednie i docelowe wartości projektowe dla akceleratora i undulatora SASE1 oraz odpowiedniej linii promienia fotonowego.*

5. Koszt, harmonogram i personel

5.1 Koszt projektu

Wszystkie koszty przygotowania projektu do fazy oddania do eksploatacji (tj. przed uruchomieniem) muszą zostać podsumowane w celu określenia całościowego kosztu budowy projektu (CKBP). Przewidywany jest okres około 2,5 roku, w trakcie którego budowa, oddawanie do eksploatacji i eksploatacja będą się nakładały (zob. także poniższe omówienie harmonogramu oraz profilu budżetowego). W koszcie CKBP mają udział pozycje podsumowane w tabeli 5.1:

- Koszty przygotowania projektu. Są to wydatki ponoszone od wejścia w życie Memorandum dot. Porozumienia w sprawie XFEL (koniec 2004) przez DESY oraz te instytucje, które zawarły kontrakty na współpracę z DESY na podstawie Mdp XFEL.
- Właściwe koszty budowy akceleratora, undulatorów, linii promieni fotonowych, instrumentarium naukowego, prac z zakresu inżynierii lądowej oraz infrastruktury technicznej Europejskiego OśrodkaXFEL, w tym inwestycje kapitałowe i siła robocza.
- Koszt oddania do eksploatacji instalacji obsługi wiązki.
- Dodatek do kosztów personelu, mający objąć świadczenia dla personelu przenoszącego się z kraju rodzinnego w celu wykonywania pracy dla spółki XFEL.
- Dodatkowe globalne koszty personelu, dotyczące kosztów zarządu spółki XFEL oraz koszty wsparcia.

Koszty powtarzające się w trakcie właściwej budowy (elektryczność, woda, hel) nie są uwzględniane w koszcie CKBP, ponieważ będą pokrywane przez budżet operacyjny DESY bez opłat ze strony projektu XFEL. Koszty związane z uzyskaniem gruntów również nie są uwzględniane w CKBP, ponieważ Niemcy zaoferowały projektowi odstąpienie gruntów za darmo.

Przygotowanie projektu.	38,8 M€
Budowa w ramach projektu, inwestycje kapitałowe	736,3 M€
Budowa w ramach projektu, personel	233,4 M€
Całkowity koszt budowy	969,7 M€
Oddanie linii promienia do eksploatacji	54,9 M€
dodatkowe koszty personelu (świadczenia) GmbH	6,1 M€
Dodatkowe koszty ogólne zarządu GmbH	12,1 M€
Całkowity koszt budowy projektu	1 081,6 M€

Tabela 5.1: *Całkowity koszt budowy projektu, w tym fazy przygotowania i oddania do eksploatacji. Wszystkie kwoty kosztów określone na podstawie cen z roku 2005.*

Jak opisano szczegółowo w rozdziale 10, rozbięcie tych kosztów na główne komponenty instalacji zostały pokazane na Rys. 5.1.



Rys. 5.1: *Rozbicie właściwych kosztów budowy (sumy inwestycji kapitałowych oraz kosztów personalnych) na pakiety robocze odpowiadające głównym komponentom instalacji.*

Analiza ryzyka przekroczenia budżetu została przeprowadzona zgodnie z wytycznymi wskazanymi przez podgrupę ds. Pełnego Finansowania (FCI) Grupy Roboczej ds. Administracyjnych i Finansowych (AFI). Wynikowy budżet ryzyka (8% kosztów właściwej budowy) wynosi 78 M€ i stanowi dodatkową kwotę, wymaganą by podnieść prawdopodobieństwo zakończenia budowy instalacji w ramach budżetu do 98%.

Szacunkowy roczny koszt eksploatacji Instalacji, po zakończeniu budowy, wynosi 83,6 M€, co obejmuje wszystkie koszty stałe eksploatacji, konserwacji i odnawiania, jak też wsparcia działań użytkowników międzynarodowych oraz programów doktoranckich i programów dla goszczących naukowców.

5.2 Harmonogram programu

Harmonogram projektu został przedstawiony na Rys. 5.2, który zakłada oficjalne rozpoczęcie budowy projektu w styczniu 2007. Dla każdej z głównych części instalacji, fazy w trakcie budowy (które mogą się częściowo nakładać) można określić w sposób następujący:

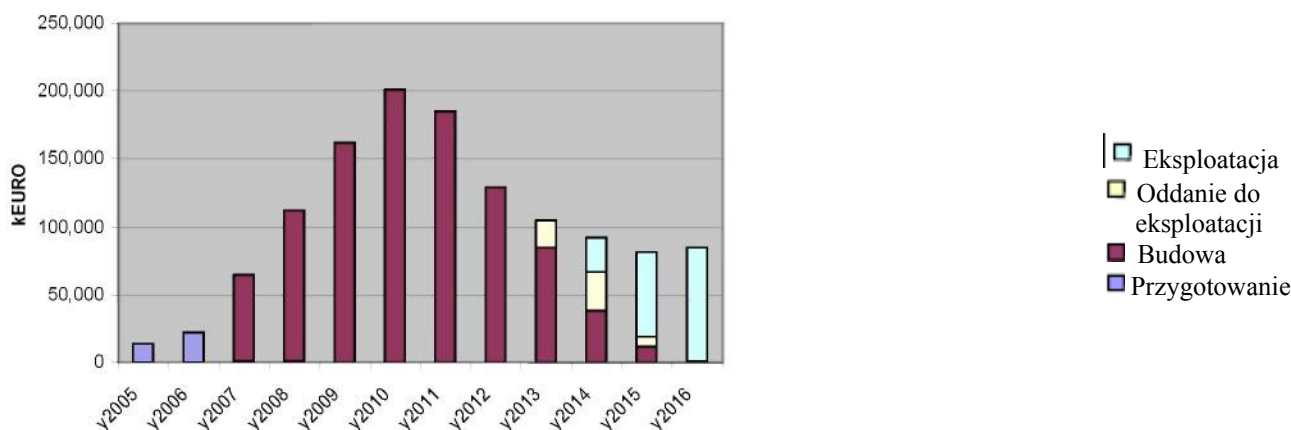
- Projektowanie, przygotowanie prototypów i industrializacja
- Wytworzenie (w tym serii wstępnych)
- Instalacja
- Oddanie do eksploatacji (technicznej, z użyciem wiązki)

Podsumowując, harmonogram budowy wskazuje punkt kluczowy wprowadzenia pierwszej linii promienia do akceleratora liniowego w 6,5 roku od rozpoczęcia budowy. W tym momencie pierwsza gałąź linii promienia z undulatorem SASE1 będzie również zainstalowany. Oddanie sekcji obsługi promienia do eksploatacji będzie postępowało aż do osiągnięcia pośrednich punktów kluczowych uzyskania promieniowania z SASE1, w 7,5 roku po rozpoczęciu budowy. Ta linia promienia zostanie następnie uruchomiona do pierwszych eksperymentów. Następnie oddane zostaną do eksploatacji pozostałe linie promienia.

5.3 Profil budżetowy

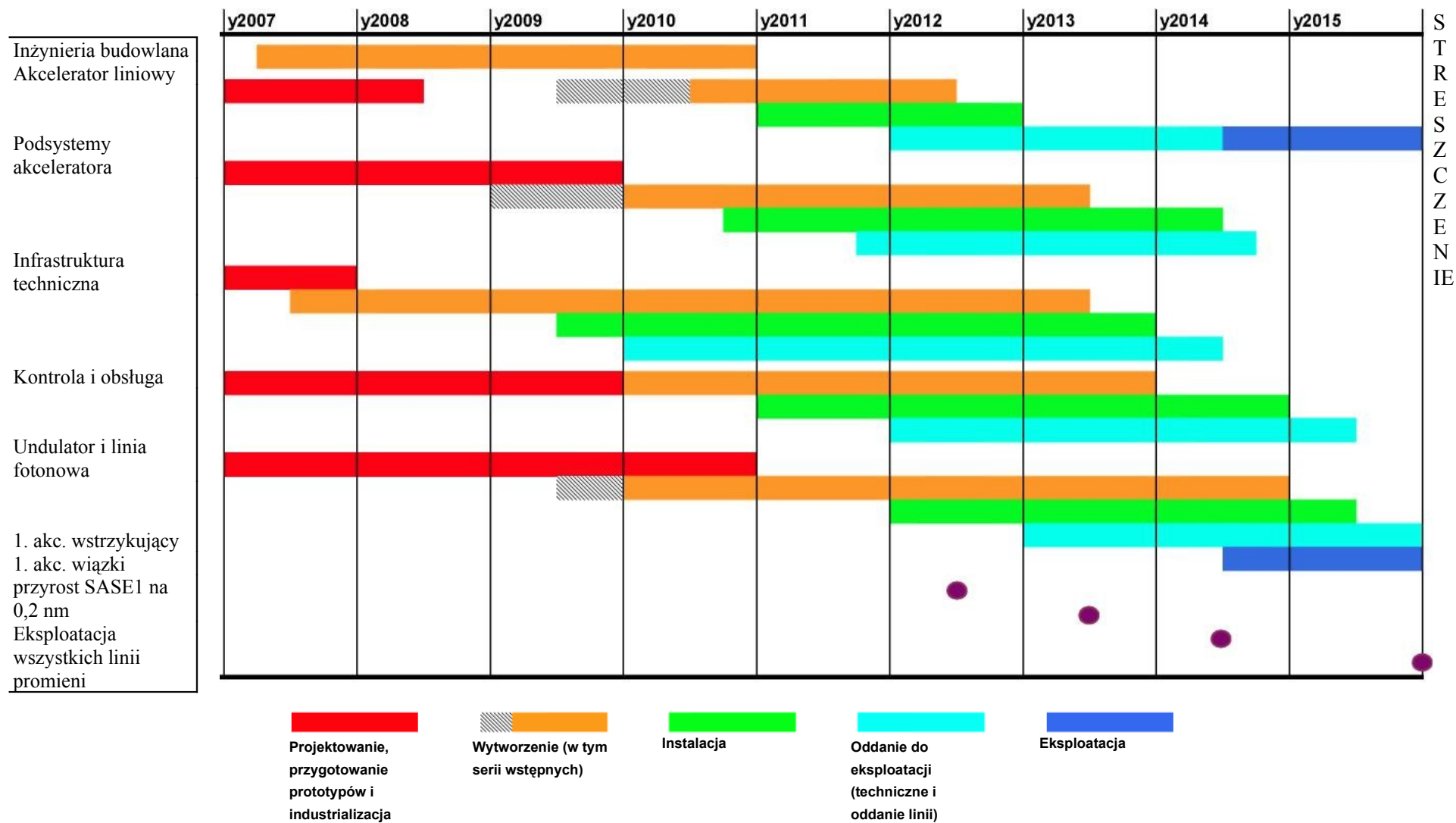
Biorąc pod uwagę różne elementy kosztu CKBP podsumowane powyżej oraz harmonogram realizacji oraz koszty operacyjne, jak je opisano w rozdziale 8, można skonstruować pełny profil budżetowy dla wszystkich faz, od przygotowania do eksploatacji. Wynik został pokazany na rysunku 5.3, pokazującym roczny budżet od 2005 do 2016, oparty o ceny z roku 2005 (tj. bez ich zwiększenia w celu uwzględnienia inflacji).

Profil budżetowy Europejskiego projektu XFEL



Rys. 5.3: Profil budżetowy (suma inwestycji kapitałowych i kosztów personelu na podstawie cen z 2005) od fazy przygotowania do fazy eksploatacji projektu.

Koszty personelu, wykazane wyraźnie w Tabeli 5.1 oraz implícite na Rys. 5.3, odpowiadają kosztom personelu wynajętego przez zarząd Instalacji, plus koszty personelu dla tych pakietów roboczych projektu, które dostarczane są jako wkłady materialne przez laboratoria z krajów biorących udział w projekcie.



Rysunek 5.2: Szkic harmonogramu dla głównych komponentów Instalacji, od rozpoczęcia budowy do rozpoczęcia eksploatacji.

Część B
Projektu Technicznego nr 1
Scenariusz Szybkiego Uruchomienia Europejskiego Ośrodka XFEL

Scenariusz szybkiego uruchomienia Europejskiego Ośrodka XFEL

Podstawowe cechy referencyjnej konfiguracji uruchomienia

Dostępne będzie pełne widmo fotonowe określone w Opisie Technicznym(OT), jednak konfiguracja rozruchowa będzie zawierała tylko 3 tory wiązki (zamiast 5) i 6 stacji eksperymentalnych (zamiast 10). Utrzymane będą parametry akceleratora określone w OT, tak, że urządzenie może osiągnąć parametry odniesienia przy długości fali fotonu 0.1 nm. Jednakże nadwyżka energii akceleratora w stosunku do trybu standardowego (17.5 GeV) zostanie usunięta. Planowane są redukcje kosztów w taki sposób, że konfiguracja rozruchowa będzie rozszerzana do urządzenia określonego w OT. Wszystkie elementy pominięte lub zredukowane mogą być wstawione spowrotem podczas okresu budowy lub później w zależności od tego czy i kiedy dostępne będzie wymagane finansowanie. Jednakże, aby uniknąć dodatkowego wysiłku i kosztów, decyzja co do instalowania pewnych elementów musi być podjęta w ramach określonego czasu. *Te krytyczne punkty czasowe są przedstawione poniżej dla głównych elementów podlegających redukcji.*

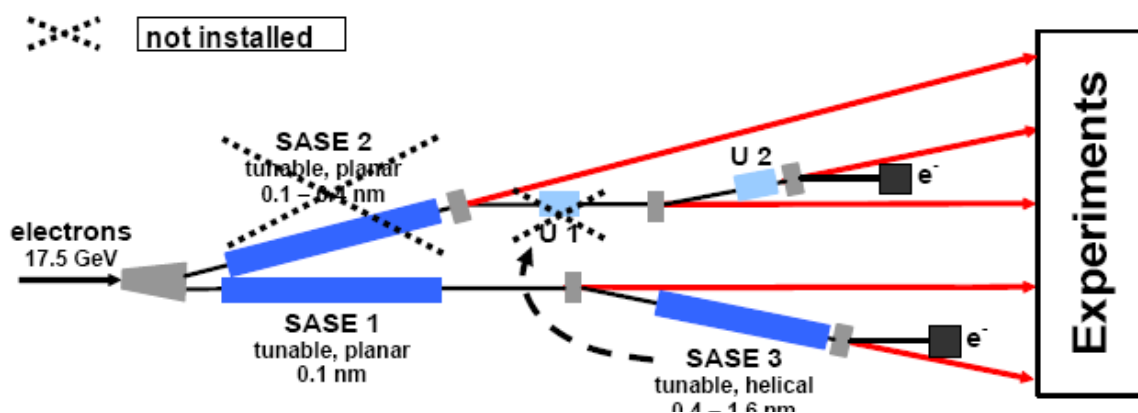
Szczegóły redukcji kosztów i ich efekty

Kompleks akceleratorowy

Cztery jednostki (cztery moduły akceleracyjne i jedna stacja częstości radiowej na jednostkę) w głównym bloku liniaka (za drugim etapem kompresji wiązki) nie będą instalowane. Redukuje to planowaną energię liniaka z 20 do 17.5 GeV i liczbę jednostek rezerwowych z dwu do jednej w tej części akceleratora (inna jednostka rezerwowa pozostaje w sekcji pomiędzy kompresorami wiązki). Działanie przy energii odniesienia 17.5 GeV z parametrami zgodnymi z OT jest gwarantowana. Jednak możliwość powiększenia energii wiązki i szybkości repetycji zostaje silnie ograniczona. *Decyzja instalowania początkowo zredukowanych jednostek będzie musiała być podjęta w momencie rozpoczęcia procesu przetargowego na elementy liniaka (środek 2008).* Kompletny system wiązek elektronowych włączając pochłaniacze wiązki zostanie zbudowany jako część konfiguracji rozruchowej natomiast instalacja pewnych specjalnych diagnostyk wiązki zostanie odłożona na później.

Undulatory i część eksperymentalna

Rozważana jest redukcja liczby undulatorów z pięciu do trzech. Odpowiednio do tego redukowana jest liczba stacji doświadczalnych z ich infrastrukturą (sześć zamiast dziesięciu). Dalsze cięcia w urządzeniach doświadczalnych obejmują instalacje laserów optycznych, układy badawcze otoczenia próbki, laboratoria przygotowania próbek, specjalne układy badawcze (wszystko zredukowane o 50%) i własnej budowy detektor badawczy. Jedna na trzy pełne wyposażenia detektorów powierzchniowych i detektorów cząstek zostanie opóźniona do momentu zakończenia pełnego projektu. Późniejsze rozszerzenie w kierunku początkowego układu będzie możliwe. Następny rysunek ilustruje jedną z możliwości zaradzenia zmianie. Ma ona na celu pokrycia tego samego zakresu widmowego energii fotonów, jak to przewidziano w OT chociaż ze zredukowaną możliwością równoległego wykorzystania aparatury. Na rysunku pokazano opcje przesunięcia SASE 3 z położenia pierwotnego na pozycję U1



Rys. 1 Możliwości usytuowania undulatora w pierwszym kroku XFEL

Byłoby to korzystne, gdyby budowa toru wiązki SASE 2 musiała być odłożona na dłuższy czas ponieważ dwa początkowo zainstalowane tory wiązki SASE mogłyby być eksploatowane w dwu oddzielnych torach wiązki dając większą swobodę manewrowania. W dokumencie poniżej wymienione są 4 możliwe warianty powyższego

scenariusza odniesienia pokazujące, że nadal dysponujemy wielką swobodą w wyborze linii wiązki fotonowej i stacji w ramach pierwszego etapu projektu. *Początek okresu co do decyzji o liczbie i konfiguracji undulatorów rozpoczyna się w momencie umieszczenia pierwszego zamówienia. To zamówienie jest planowane na drugą połowę 2009. Oczekiwać jednak można wpływu na rozbudowę detektorów powierzchniowych gdzie decyzja jest przewidywana podczas pierwszej połowy 2007.*

Infrastruktura techniczna

Zamiast budowy nowej instalacji skraplania helu, istniejąca instalacja HERA zostanie wzmocniona i rozbudowana. Dwie z trzech jednostek skraplających zostaną wykorzystane w XFEL'u, a pozostała jedna we FLASH'u. Ograniczy to nadmiarowość w przypadku defektów, ale jedna z dwu jednostek nadal wystarcza aby utrzymać linię schłodzoną a nawet eksploatować go z ograniczonymi parametrami. DESY traci możliwość wykorzystywania części instalacji do innych celów.

Urządzenie do testowania modułów zostanie zredukowane przez połączenie stanowiska testowania wnęki poziomej (początkowo oddzielnego) z jedną z trzech stacji testowania modułów. W ten sposób w czasie, gdy testy pojedynczej wnęki zachodzą w kriostacie poziomym, dostępne są tylko dwa stanowiska testowania wnęk. Ponieważ oczekuje się, że będzie to miało miejsce tylko podczas początkowej fazy produkcji wnęk z małą prędkością, nie oczekuje się, aby fakt ten miał znacząco ograniczać seryjną produkcję i testowanie wnęk akceleratorowych.

Niezbędna decyzja przywrócenia tych zredukowanych elementów jest pilna – koniec 2007

Budynki

Układ podziemnych budynków jest zachowany całkowicie, aby można rozszerzyć konfigurację rozruchową na układ opisany w OT. Rozmiar budynku biurowego i stołówki przy Schenefeld Campus mogą być ograniczone, ale późniejsza rozbudowa tych budynków pozostanie możliwa. Hol nowej instalacji kriogenicznej zostaje usunięty.

Decyzja co do wprowadzenia początkowo planowanych budynków Campusu w pełnym wymiarze musiałaby być podjęta w okresie ogłaszania przetargów (w2008) a to najpóźniej w środku roku 2009, jeżeli przewiduje się ogłoszenie przetargu w kolejnych ratach

Szacunek kosztów.

Konfiguracja rozruchowa oparta na powyższych założeniach umożliwi redukcję kosztów o około 137 M€ w stosunku do sumy 986 M€ dla pełnej instalacji ustalonej w OT oraz w Aneksie 3 Konwencji. Redukcja kosztów obejmuje 106.9 M€ inwestycjach i 30.1 M€ w kosztach personelu. Podział redukcji kosztów podany jest w poniższej tabeli

Grupa prac	Redukcja kosztów ¹ względem OT		Zredukowane koszty konstrukcyjne ¹ (inwestycje i personel) instalacji XFEL w konfiguracji rozruchowej
	W inwestycjach	W personelu	
WPG1 Liniak	24,9	4,0	231,2
WPG2 Podsystemy akceleratorowe	1,6	1,1	83,6
WPG3 Undulatory i linie wiązek fotonowych	57,9	18,5	149,5
WPG4 Sterowanie i eksploatacja	0,2	0,8	38,4
WPG5 Infrastruktura	15,2	2,4	171,7
WPG6 Miejsce ibudynki	7,1	0	161,6
Dodatkowe koszty spółki GmbH		3,3	13,3
Suma:	106,9	30,1	849,3

¹ (podstawa cenowa M€, rok 2005)

Alternatywne scenariusze dla instalacji rozruchowej

W następnych paragrafach rozważane są alternatywne scenariusze realizacji konfiguracji rozruchowych Europejskiego OśrodkaXFEL. Te alternatywy pokazują, że budżet konfiguracji rozruchowej XFEL, a w szczególności zredukowany budżet systemów wiązek fotonowych pozwala utrzymać elastyczność potrzebną do zaspokojenia potrzeb wspólnoty naukowej. Ponieważ nie jest natychmiast wymagana (jeżeli w ogóle) ostateczna decyzja co do wyboru poszczególnej opcji, zostanie ona szczegółowo przedyskutowana z przedstawicielami zainteresowanych wspólnot naukowych. Podane koszty odnoszą się do kosztów wymienionych w opisanym powyżej scenariuszu bazowym.

Scenariusz alternatywny A

W tym scenariuszu przyjęto jedynie umiarkowaną modyfikację, w której zamiast SASE 1 zostaje zainstalowana początkowo strojona przerwowo instalacja SASE 2. Pozwoliłoby to na wykorzystywanie akceleratora przy stałej energii, podczas gdy energia fotonów byłaby strojona przez zmiany przerwy undulatora. Aby skompensować wyższe koszty budowy SASE 2 w stosunku do SASE 1, undulator miękkich promieni X w FEL nie jest budowany w technologii spiralnej lecz jako bardziej konwencjonalne urządzenie planarne. Zredukowane koszty badawcze i konstrukcyjne instalacji planarnej umożliwiają znaczne oszczędności. Późniejsze rozszerzenie do spiralnego FEL dostarczającego kołowo spolaryzowane promieniowanie mogłoby być zrealizowane przez wymianę jedynie elementów undulatorów z obszaru końcowego wzmocnienia. Koszt tego scenariusza jest niższy o 2,7 M€ w stosunku do scenariusza bazowego. *Moment czasowy co do decyzji na rzecz tego scenariusza zależy od liczby zamówionych segmentów undulatora (połowa 2009) i stanu zaawansowania badań nad undulatorami spiralnymi (początek - nie później niż pod koniec 2008)*

Scenariusz alternatywny B

W tym scenariuszu położono nacisk na zapewnienie twardego promieniowania X przez utrzymanie zarówno SASE 1 dla twardego promieniowania, jak i SASE 2. Aby skompensować wyższe koszty tych urządzeń, nie przewiduje się budowy innych undulatorów na pierwszym etapie projektu. Jednak, ponieważ hala eksperymentalna zapewnia dostateczną ilość miejsca, wokół tych dwu undulatorów nadal można zbudować sześć aparatur badawczych. W tym scenariuszu rezerwy pozyskane dla undulatora i wiązek mogłyby być wykorzystane na zwiększenie kosztów otoczenia próbki i badań detektorowych. Koszt tego scenariusza jest niższy o 1,1 M€ w stosunku do scenariusza odniesienia. *Ten scenariusz może być rozbudowany do pełnej skali w każdej chwili bez specjalnego wzrostu kosztów. Jednak jeżeli chodzi o spiralny SASE 3 należy mieć na względzie, że etap badawczy musi rozpocząć się 2.5 roku przed datą instalacji.*

Scenariusz alternatywny C

W tym scenariuszu wszystkie 3 undulatory FEL - SASE 1, SASE 2 i SASE 3 są zachowane na pierwszym etapie projektu. Przyjmuje się, że undulator miękkich promieni rentgenowskich FEL będzie miał konfigurację planarnego pola magnetycznego. Aby skompensować rosnący koszt undulatorów, proponuje się, aby liczba urządzeń badawczych została zredukowana z sześciu do czterech. Można wyobrazić sobie, że te cztery urządzenia zostaną zainstalowane na liniach twardych wiązek X SASE 1 i SASE 2, natomiast linia wiązki miękkich promieni X pozostanie wolna i grupy doświadczalne zestawia swoje własne instalacje (koncepcja FLASH). Można też założyć, że aparatura naukowa na SASE 3 będzie zbudowana ze środków zgromadzonych przez konsorcja użytkowników. Koszt tego scenariusza jest niższy o 0.9 M€ w stosunku do scenariusza bazowego. *Ten scenariusz może być rozbudowany do pełnej skali w każdej chwili bez specjalnego wzrostu kosztów. Dla spiralnej konfiguracji SASE 3 zachowuje ważność zapis dotyczący scenariusza A.*

Wnioski

Koszty konstrukcyjne 850 M€ pozwalają na budowę urządzenia w konfiguracji rozruchowej o następujących cechach:

1. Może ono być później rozbudowane do pełnej wersji określonej w OT, bez dodatkowych kosztów, jeżeli odpowiednie decyzje zapadną dostatecznie wcześniej.

2. Oferuje różnorodne warianty co do wyboru radiatorów w pierwszym kroku i w odpowiednich programach badawczych charakteryzujących się mniejszym lub większym priorytetem przyznanym twardym lub miękkim promieniom X, koherencji lub emisji spontanicznej itd.

Za zgodność tłumaczenia z oryginałem:

.....

02/28rch